

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh spalovny kapalných odpadů

Proposal of liquid Waste Incinerator

Student: Milan Polášek

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Polášek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh spalovny kapalných odpadů**
Proposal of Liquid Waste Incinerator

Zásady pro vypracování:

Vypracujte projekční návrh spalovny kapalných odpadů obsahujících škodlivé látky typu PCB. Spalovna se skládá ze spalovací komory osazené stabilizačním hořákem pro kapalný odpad, sekundární dohořivací komory, výměníku tepla spaliny - voda a ekobloku na principu dvoustupňové polosuché vypírky spalín a tkaninového filtru. Proveďte základní tepelné a aerodynamické výpočty. Jmenovitý výkon spalovny 80 kg/hod, výhřevnost kapalného odpadu je 40 MJ/kg.

Seznam doporučené odborné literatury:


Rédr, M., Příhoda, M.: Základy tepelné techniky. Praha. SNTL, 1991
ISBN 80-03-00366-0.
Sadik, K.: Boilers, evaporators, condensers. John Willey. USA. New York 1991
CIP 90-22486 v knihovně VŠB-TU Ostrava.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 13.12.2014
Datum odevzdání: 18.05.2015




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Milan Polášek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Karviná, Havířská 1187, 73506

ANOTACE

POLÁŠEK, M: *Návrh spalovny kapalných odpadů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 87 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Diplomová práce se zabývá zpracováním návrhu zařízení určené k termickému zneškodňování kapalných odpadů s obsahem látek na bázi PCB. V úvodní části se věnuji zákonům a zásadám pro spalování kapalných odpadů. V následujících kapitolách provádím rozbor způsobů spalování. Výpočtová část obsahuje návrh spalovací, dohořivací komory a navazující zařízení pro čištění spalin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spalovna; spalování odpadu; kapalný odpad; emisní limity; čištění spalin

ANNOTATION

POLÁŠEK, M: *Proposal of Liquid Waste Incinerator: thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2015, 87 p. Supervisor: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

This thesis deals with processing of draft of equipment intended for thermal disposal of liquid waste containing substances based on PCB. First part of this thesis is devoted to the laws and principles for the incineration of liquid waste. There are analyzed the ways of combustion in the following chapters. Computational part includes a proposal combustion, combustion chamber and related equipment for flue gas cleaning.

KEYWORDS

Incinerator; waste incineration; liquid waste; emission limits; cleaning flue gas

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	9
1 ÚVOD	13
2 LEGISLATIVA	14
2.1 Právní normy pro nakládání s odpady	14
2.2 Základní pojmy ve znění zákona č. 185/2001 Sb.	14
3 POLYCHLOROVANÉ BIFENYLY (PCB)	16
3.1 Základní charakteristika	16
3.2 Použití	17
3.3 Zdroje emisí	17
3.4 Dopady na životní prostředí	17
3.5 Dopady na zdraví člověka	18
4 TERMICKÉ METODY A ZAŘÍZENÍ PRO ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADŮ	19
4.1 Termické zneškodnění odpadů	19
4.1.1 Spalování odpadů	20
4.1.2 Pyrolýza odpadů	20
4.1.3 Zplyňování odpadů	20
4.2 Vlastnosti spalovaných odpadů	20
4.3 Výhody a nevýhody spalování	21
4.4 Zařízení vhodná ke spalování kapalných odpadů	22
4.4.1 Bubnové rotační pece	22
4.4.2 Muflové pece	23
4.4.3 Fluidní pece	23
4.4.4 Prostorové pece	23
5 NÁVRH SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	25
5.1 Koncepce návrhu	25
5.2 Výpočet	27
5.2.1 Spalování odpadu	27
5.2.2 Spalování stabilizačního paliva	28
5.2.3 Určení výkonu hořáků	29
5.2.4 Rozměry spalovací komory	34

5.2.5	Rozměry dohořivací komory	35
5.2.6	Návrh vyzdívek	37
5.3	Návrh výměníku tepla	46
5.3.1	Entalpická bilance výměníku tepla	46
6	NÁVRH PRAČKY SPALIN	47
6.1	Výpočet délky reakčních komor	48
6.1.1	Model kapky	48
6.1.2	Počáteční rychlost kapky	48
6.1.3	Hmotnost kapky	50
6.1.4	Přenos tepla při ohřevu a vypařování kapky	50
6.1.5	Určení rychlosti pohybu kapky	54
6.2	Určení průměru dvoustupňové pračky spalin	58
6.3	Výpočet potřebného množství sorbentu	59
6.4	Tryska sorbentu	59
6.5	Teplota spalin na výstupu z pračky	59
6.5.1	Výstupní teplota spalin z prvního stupně pračky	61
6.5.2	Výstupní teplota spalin z druhého stupně pračky	61
6.6	Příprava sorbentu	62
6.7	Návrh kompresoru a čerpadla	62
7	NÁVRH FILTRU SPALIN	63
8	AERODYNAMICKÉ VÝPOČTY	64
8.1	Tlaková ztráta před pračkou spalin	65
8.2	Tlaková ztráta pračky spalin	65
8.2.1	První stupeň pračky	65
8.2.2	Druhý stupeň pračky	67
8.3	Spojovací potrubí mezi pračkou spalin a filtrem	68
8.4	Tlaková ztráta filtru spalin	69
8.5	Návrh spalínového ventilátoru	70
8.6	Komín	70
9	REGULACE	71
10	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK	78

SEZNAM PŘÍLOH.....	79
SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE	79

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Značka	Název veličiny	Jednotka
Δp	Celková tlaková ztráta	Pa
Δp_{pp}	Celková tlaková ztráta před pračkou spalin	Pa
Δp_{zCS}	Celková tlaková ztráta ve spojovacím potrubí	Pa
Δp_{zcF}	Celková tlaková ztráta ve filtru	Pa
Δp_{zcP}	Celková tlaková ztráta v pračce	Pa
Δp_{zm}	Tlaková ztráta místními odpory	Pa
Δp_{ztr}	Tlaková ztráta třením	Pa
a	zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
a_{sp}	Součinitel teplotní vodivosti spalin	$m^2 \cdot s^{-1}$
C_o	Součinitel sálání absolutně černého tělesa	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$c_{p,k}$	Měrná tepelná kapacita kapky	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{sp}	Měrná tepelná kapacita spalin	$kJ \cdot m_N^{-3} \cdot K^{-1}$
d_{dk}	Průměr dohořivací komory	m
d_{dkl}	Průměr příslušné vrstvy stěny dohořivací komory	m
D_k	Maximální průměr kapky	m
D_p	Průměr reakční komory	m
d_{sk}	Průměr spalovací komory	m
d_{skl}	Průměr příslušné vrstvy stěny spalovací komory	m
D_t	Průměr trysky	m
$E_{1,20}$	Množství tepelné energie při dané teplotě	$MJ \cdot h^{-1}$
g	Tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
l_{dk}	Délka dohořivací komory	m
l_{ef}	Efektivní délka paprsku	m
l_{sk}	Délka spalovací komory	m
M_k	Hmotnost kapky	kg

m^o	Množství odpadu	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
m^p	Množství paliva	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
m_v	Množství ohřáté vody ve výměníku	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
n	Součinitel přebytku vzduchu	1
N_1	Výkon zapalovacího hořáku	kW
N_2	Výkon dohořivacího hořáku	kW
N_k	Tepelný výkon	kW
Nu	Nusseltovo kritérium	1
n_v	Otáčky ventilátoru	s^{-1}
p_1	Tlak vzduchu na vstupu do trysky	MPa
p_o	Tlak v reaktoru	MPa
Pr	Prandtlovo kritérium	1
Pr'	Prandtlovo kritérium při určující teplotě odpovídající teplotě stěny	1
q	Tepelný tok	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Q_i	výhřevnost	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
q_p	Tepelný tok ocelovým pláštěm	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Q_s	Množství sorbentu	$\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$
Re	Reynoldsovo kritérium	1
S_{dk}	Průřez dohořivací komory	m^2
s_k	Dráha pohybu kapky v pračce	m
S_{sk}	Průřez spalovací komory	m^2
T	Absolutní teplota	K
t_{2I}	Výstupní teplota z prvního stupně pračky	$^{\circ}\text{C}$
t_{2II}	Výstupní teplota z druhého stupně pračky	$^{\circ}\text{C}$
t_s	Teplota sorbentu na vstupu do pračky	$^{\circ}\text{C}$
T_{sk}	Absolutní teplota spalín ve spalovací komoře	K
$T_{st,sk}$	Absolutní teplota vnitřního povrchu žáruvzdorné vrstvy spalovací komory	K

$t_{st1,dk}$	Teplota příslušné vrstvy stěny dohořivací komory	$^{\circ}\text{C}$
$t_{st1,sk}$	Teplota příslušné vrstvy stěny spalovací komory	$^{\circ}\text{C}$
V_{dk}	Objem dohořivací komory	m^3
v_k	Výsledná rychlost kapky	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V_{NS}	Objem nádrže sorbentu	m^3
V_{NV}	Objem nádrže na vodu	m^3
$V_{p,dk}$	Potřeba paliva pro dohořivací komoru	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$V_{p,sk}$	Potřeba paliva pro spalovací komoru	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
V_{sk}	Objem spalovací komory	m^3
$V_{sp,celk}$	Celkové množství vlhkých spalin	$\text{m}_N^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{sp,dk,s}$	Celkové skutečné množství vlhkých spalin při dané teplotě v dohořivací komoře	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{sp,F}$	Množství spalin jdoucích do filtru	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{sp,s}$	Skutečné množství vlhkých spalin	$\text{m}_N^3\cdot\text{kg}^{-1}$
$V_{sp,sk,s}$	Celkové skutečné množství vlhkých spalin při dané teplotě ve spalovací komoře	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
V_{vzd}	Skutečné množství spalovacího vzduchu	$\text{m}_N^3\cdot\text{kg}^{-1}$
v_{vzd}	Rychlost proudění vzduchu na výstupu z trysky	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{vzd,celk}$	Potřebné množství vzduchu pro obě komory	$\text{m}_N^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{vzd,dk}$	Potřebné množství vzduchu pro dohořivací komoru	$\text{m}_N^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{vzd,min}$	Teoretické množství spalovacího vzduchu	$\text{m}_N^3\cdot\text{kg}^{-1}$
$V_{vzd,sk}$	Potřebné množství vzduchu pro spalovací komoru	$\text{m}_N^3\cdot\text{s}^{-1}$
$V_{vzd,SM}$	Potřebné množství vzduchu pro směšovač	$\text{m}_N^3\cdot\text{s}^{-1}$
W	Obsah vody	%
w_{sp}	Rychlost proudění spalin	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$w_{sp,stř}$	Střední rychlost proudění spalin v difuzoru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
x	Posunutí kužele trysky	m
α	Celkový součinitel přestupu tepla	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
α_k	Součinitel přestupu tepla konvekcí	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

$\alpha_{k'}$	Skutečný součinitel přestupu tepla konvekcí	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_s	Součinitel přestupu tepla sáláním	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_{vzd}	Součinitel přestupu tepla vzduchu	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
ε	Korekční součinitel	1
ε_{sk}	Celková poměrná pohltivost	1
ε_{sp}	Poměrná pohltivost spalin	1
ε_{st}	Poměrná pohltivost stěny	1
η	Účinnost	%
λ	Tepelná vodivost	$W \cdot m_N^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{dk1}	Tepelná vodivost příslušné vrstvy stěny dohořivací komory	$W \cdot m_N^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{sk1}	Tepelná vodivost příslušné vrstvy stěny spalovací komory	$W \cdot m_N^{-1} \cdot K^{-1}$
ν	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ_k	Hustota kapky	$kg \cdot m^{-3}$
τ_{1k}	Doba ohřevu kapky	s
τ_{2k}	Doba vypaření kapky	s
$\tau_{dk,s}$	Skutečné zdržení spalin v dohořivací komoře	s
τ_k	Doba ohřevu a vypaření kapky	s
$\tau_{sk,s}$	Skutečné zdržení spalin ve spalovací komoře	s

1 ÚVOD

Extrémní nárůst obyvatel naší planety je spojen se stále rostoucí produkcí odpadů. Dá se říci, že mezi ekonomickým rozvojem a produkcí odpadů existuje přímá úměra. Problematika zneškodnění odpadů se dostává do popředí zájmů nejen u nás, ale i po celém světě. Je zapotřebí, abychom odpadovému hospodářství věnovali značnou pozornost a tedy, aby bylo považováno za jednu z nejdůležitějších složek ochrany životního prostředí člověka. Prvotním cílem je minimalizace nebo nejlépe úplné zamezení vzniku odpadů. Tohoto záměru bohužel není jednoduché dosáhnout. Dalším cílem je po neúspěšném zamezení vzniku odpadů jejich likvidace.

Zneškodnění odpadů lze dosáhnout několika způsoby. Nejprogresivnější metodou je termická likvidace odpadů – tedy spalování. Velkou výhodou spalování odpadů je radikální zmenšení objemu odpadů. Mezi další výhody patří možnost využití tepla spalin vzniklé z odpadů a rychlost procesu zneškodňování. Naopak největší nevýhodou spalování je nárůst investičních nákladů spojený se vznikem škodlivých emisí. Aby došlo k co nejučinnějšímu čištění spalin od škodlivých složek, jsou zapotřebí finančně drahá zařízení.

V této práci se zabývám likvidací kapalných odpadů na bázi PCB (polychlorované bfenyly). V 70. letech bylo zjištěno, že se tyto látky nerozkládají. Negativně tedy ohrožují životní prostředí i lidské zdraví. Z toho důvodu se výrobky s obsahem PCB už nevyrábějí. Přesto, že se nevyrábějí, jejich emise pocházejí z výrobků, jež jsou ještě v oběhu od dob výroby.

V úvodní části práce zlehka nahlížím do legislativy týkající se odpadovému hospodářství. Popisují termické metody spalování a s těmi spojené druhy spalovacích zařízení. Výpočtová část obsahuje spalování odpadu a stabilizačního paliva, výpočet spalovací a dohořívací komory a návrh jejich vyzdívek a hořáků. Následuje podrobný výpočet dvoustupňové pračky spalin a s tím související množství sorbentu sloužící pro jejich čištění.

2 LEGISLATIVA

Legislativa, která se zabývá problematikou nakládání s odpady je dosti rozsáhlá. Z tohoto důvodu zde uvádím pouze výběr těch nejvýznamnějších zákonů a nařízeních vlády týkající se odpadů.

2.1 Právní normy pro nakládání s odpady

Zákon č. 185/2001 Sb. - jedná se o hlavní právní normu, kterou se v našem státě řídí nakládání s odpady. Zákon definuje základní pojmy odpadů, práva a povinnosti orgánů státní správy. Jejich aktivity v oblasti zacházení s odpady, povinnosti původců, přepraveců a dopravců odpadů, právnických a fyzických osob, které se výkupem, sběrem a zneškodnění odpadů zabývají.

Předpis č. 381/2001 Sb. – tento předpis obsahuje katalog odpadů a další seznamy týkající se odpadů.

Předpis č. 376/2001 Sb. – vyhláška Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů

Předpis č. 383/2001 Sb. – vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady. Konkretizuje postupy nakládání, shromažďování a skladování nebezpečných odpadů.

Předpis č. 384/2001 Sb. – vyhláška o nakládání s odpady, které obsahují polychlorované bifenylly (PCB).

Předpis č. 521/1991 Sb. – nařízení vlády o vedení evidence odpadů. Ukládá povinnost všem původcům i zpracovatelům odpadů vést přesnou evidenci o druhu, množství, využití a zneškodnění odpadů. [1]

2.2 Základní pojmy ve znění zákona č. 185/2001 Sb.

Odpad – odpadem se rozumí každá movitá věc, která se pro vlastníka stala nepotřebnou, osoba se jí zbavuje, má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Seznam věcí, které se dle zákona používají za odpad, je uveden v *Příloze A*.

Nebezpečný odpad – je to odpad, který vykazuje jednu nebo více nebezpečných vlastností. Tyto vlastnosti jsou uvedeny v *Příloze B*. Seznam nebezpečných odpadů, které podléhají zprůsňnému režimu je uveden v *Příloze C*.

Odpadové hospodářství – je činnost, která se věnuje předcházení vzniku odpadů, nakládání s odpady a následně místu kde jsou odpady trvale uloženy a zaměřuje se na kontrolu těchto činností.

Nakládání s odpady – jedná se o jejich shromažďování, sběr, výkup, přeprava, doprava, skladování, úprava, využití a odstranění (zneškodňování) odpadů.

Využití odpadů – činnost, jejímž výsledkem je, že odpad slouží k užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu (spalování – odpad místo uhlí).

Zneškodňování odpadů – je takové nakládání s odpady, které míří k trvalému zabránění škodlivých vlivů na životní prostředí. Zahrnuje zejména termickou a chemickou úpravu, biologickou a fyzikální stabilizaci. Zahrnuje ukládání na skládku a do pozemních prostor. [2]

3 POLYCHLOROVANÉ BIFENYLY (PCB)

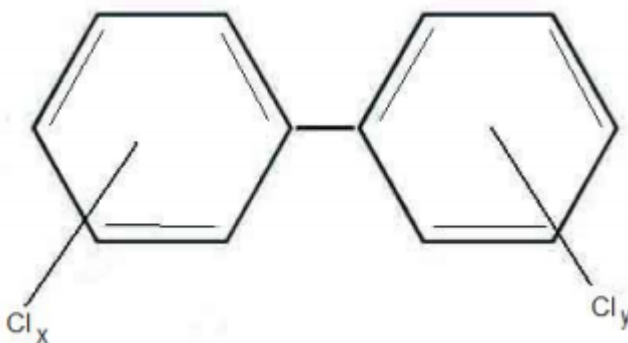
Další možné názvy – Delor, Aroclor, Clophen, Pehnochlor, Kanechlor, Pyranol a další.

Chemický vzorec: $C_{12}H_{10-n}Cl_n$

3.1 Základní charakteristika

Jde o skupinu látek, která zahrnuje teoreticky 209 jednotlivých sloučenin (kongenerů), ty se liší toxicitou, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Jednotlivé kongenery se liší stupněm chlorace a podle polohy atomů chloru na aromatických jádrech. Obecná struktura PCB je uvedena na obrázku č. 3-1. V komerčních směsích se nachází jen 130 kongenerů. Kongenery jsou samy o sobě bezbarvé krystaly bez zápachu, ale v komerčním použití jsou směsi PCB kapaliny. Hustota směsí je závislá na množství chloru (stupni chlorace). Hustota se zvyšuje růstem obsahu chloru. Jednou ze společných vlastností všech kongenerů je nízká rozpustnost ve vodě ($0,7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Jsou rozpustné v širokém rozsahu organických rozpouštědel a v tucích a také chemicky a fyzikálně stálé.

Tyto látky se v přírodě přirozeně nenacházejí, jsou vyráběny člověkem. Látky PCB byly objeveny na přelomu 19. a 20. Století. V průmyslu se používají od 30. let 20. Století. Bohužel v 70. letech se zjistilo, že se PCB v prostředí nerozkládají, hromadí se v potravních řetězcích. [3]



Obrázek 3-1: Obecná struktura PCB [3]

3.2 Použití

Látky PCB ohrožují životní prostředí i lidské zdraví. Z toho důvodu se výrobky s obsahem PCB už nevyrábějí. V minulosti se používaly jako přenašeče tepla v průmyslových zařízeních, které vyžadovaly ohřev na vysoké teploty. Dále se používaly jako chladicí oleje v transformátorech napětí, kondenzátorech a jiných elektrických zařízeních, kde se výrazně uplatňují jejich dobré izolační vlastnosti a stabilita. PCB byly používány také jako plastifikátory polymerů, přísada do barviv, nátěrových hmot a barev do tiskáren, jako součást prostředků na ochranu rostlin a další účely. Přidávaly se do maziv, vosků a olejů, lepidel a tmelů. Využívaly se také v nábytkářství a dekoracích interiérů. [3]

3.3 Zdroje emisí

Ačkoliv se PCB už nevyrábějí, emise pocházejí z výrobků, které jsou ještě v oběhu od dob výroby. Menší množství PCB se může objevit v celé řadě halogenovaných sloučenin. Dalším nežádoucím zdrojem emisí PCB v prostředí jsou kaly z odpadních vod, ilegální nakládání s odpady z těchto výrobků, spalování průmyslových a komunálních odpadů obsahující PCB a jejich používání. Největším zdrojem je redistribuce již uvolněných PCB. Nutno říci, že nové úniky PCB do prostředí jsou ve srovnání s minulostí minimální.

Nejvýznamnější antropogenní emise:

- Nakládání s odpady (spalování odpadů a jejich skládkování)
- Úniky ze zařízení používající PCB (kondenzátory, transformátory) [3]

3.4 Dopady na životní prostředí

Z důvodu jejich vysoké odolnosti proti rozkladu jsou složky PCB přítomné v životním prostředí po celém světě. V průběhu času dochází ke změnám ve složení směsí PCB, a to z důvodu odlišné těkavosti a degradovatelnosti jednotlivých kongenerů.

V atmosféře se látky PCB nachází převážně v plynné formě (87-100 %), menší množství je navázáno na pevné částice. Ve vodě se tyto látky sorbují na sedimenty

a organickou hmotu. Vodní sedimenty mohou sloužit jako „zásobníky“ PCB. Polychlorovanými bifenyle jsou nejvíce ohroženy vodní ekosystémy.

Odolnost PCB se zvyšuje s rostoucím množstvím chloru v molekule. Doba setrvání v atmosféře závisí na jednotlivých kongenerech, setrvat může 10 dní nebo až 18 měsíců. Jediným abiotickým degradačním procesem ve vodním prostředí je fotolýza. Ve vodě nebo půdě dochází k velmi pomalé přirozené degradaci. Mono-, di- a trichlorované bifenyle degradují poměrně rychleji, naopak výšechlorované bifenyle jsou vůči přirozené degradaci odolnější. [3]

3.5 Dopady na zdraví člověka

Složky PCB mohou do těla vstupovat inhalačně a hlavně orálně (kontaminovanou potravou). Potraviny mohou být kontaminovány přímo, migrací kontaminantu z obalu nebo příjmem PCB z prostředí organismy jako jsou ryby, ptáci nebo hospodářská zvířata.

Polychlorované bifenyle se koncentrují zejména v játrech, tukových tkáních a mateřském mléce. Koncentrace PCB v různých orgánech je závislá na obsahu tuku. Setrvání v orgánech se u jednotlivých orgánů liší. Vyšší stálost však vždy neznamená vyšší toxicitu. Vznikem meziproductů a metabolitů mohou způsobit rozdíly v toxicitě.

Působení PCB ovlivňuje, srdce, mozek, oči, imunitní systém, játra, ledviny a štítnou žlázu. U těhotných žen se může projevovat jako neurologické poruchy u dětí. Expozice PCB může ovlivňovat dýchací ústrojí (kašel), trávicí trakt (zvracení, bolesti břicha, ztráta hmotnosti, anorexie), oči a kůži (vyrážky). Může taky způsobit rakovinu jater.

Důvody zařazení do registru:

- Stockholmská úmluva
- CLRTAP
- Zákon č. 254/2001 Sb.
- Zákon č. 201/2012 Sb.
- Zákon č. 350/2011 Sb. [3]

4 TERMICKÉ METODY A ZAŘÍZENÍ PRO ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADŮ

4.1 Termické zneškodnění odpadů

Termické, neboli tepelné metody zneškodňování odpadů můžeme souhrnně označit jako technologie, při kterých působí na odpadní látku teplota překračující meze její chemické stability, případně spolupůsobení kombinace vysoké teploty s určitým množstvím vzduchu. Pod tuto definici můžeme zahrnout jednotlivé pojmy, jako jsou spalování, zplyňování, pyrolýza, plasmové metody apod.

Těmito způsoby sice dochází k přeměně z nebezpečných látek na neškodné produkty, ale musíme myslet na to, že při procesu vznikají vedlejší produkty, což je struska (popel) a plynné látky, ve kterých jsou obsaženy plynné i pevné škodlivé částice.

Jako základní kritérium pro třídění termických procesů je druh prostředí v reakční komoře. Je charakterizován obsahem kyslíku vůči odpadní látce, kterou chceme zneškodnit. Podle toho se dělí tyto procesy na:

a) procesy oxidační

Jde o procesy termického zneškodňování odpadu s obsahem kyslíku v reakční komoře stechiometrickým nebo vyšším. Množství kyslíku obsažený v reakčním prostoru závisí na druhu a obsahu hořlavých látek ve zpracovávaném odpadu. V tomto případě se jedná o spalování odpadů. Další členění spalovacích procesů lze provést podle teplot v reakčním prostoru na procesy:

- nízkoteplotní, s teplotou do 1000 °C
- vysokoteplotní, s teplotou nad 1000 °C

U současných termických zařízení je za spalovací komorou (teplota v rozmezí 850 °C až 1000 °C) umístěna dohořivací komora, v níž dochází ke zvýšení teploty spalin přiváděných z reakční komory na požadovanou teplotu v rozmezí 1000-1300 °C. Důsledkem této skutečnosti ztrácí předchozí rozdělení na významu.

b) procesy redukční

Jsou to procesy termického zneškodňování odpadů, při kterém je obsah kyslíku nulový nebo podstechiometrický. K těmto procesům se řadí zplyňování a pyrolýza.

Dle předchozích podkladů lze rozdělit metody zneškodňování odpadů na tři základní skupiny:

4.1.1 Spalování odpadů

Jedná se o slučování hořlavých složek odpadů s kyslíkem, který může býtstechiometrický nebo nadstechiometrický.

4.1.2 Pyrolýza odpadů

Principem tohoto procesu je tepelný rozklad organických odpadních látek za nepřístupu vzduchu (neboli oxidačních médií – kyslík, oxid uhličitý, vodní pára) v reakčním prostoru. Při tomto procesu dochází k rozpadu organických látek na jednoduché těkavé produkty a koks při teplotách v rozmezí 500 °C až 1000 °C.

4.1.3 Zplyňování odpadů

Při teplotách nad 800 °C dochází k rozkladu odpadních látek za podstechiometrického obsahu kyslíku v reakční komoře. Uhlíkaté materiály se přeměňují na hořlavé látky v plynném stavu, v požadovaném složení. [4]

4.2 Vlastnosti spalovaných odpadů

Technologie spalování odpadů se může použít pro širokou škálu odpadů. Jedná se o odpady komunální, průmyslové i zemědělské vyskytující se ve všech formách skupenství – tuhé, kapalné, plynné.

Velké množství spalitelných odpadů se považuje za méněhodnotná paliva, jejich spalování se potkává s obtížemi. Hlavním důvodem je značná různorodost chemických

i termofyzikálních vlastností odpadního materiálu nebo vysoký obsah vlhkosti. Každé palivo je charakterizováno jiným množstvím hořlavé látky (hořlavina s obsahem spalitelných látek – uhlík (C), síra (S), vodík (H), obsahem popela (celkové množství minerálních látek, označen písmenem A) a obsahem vody (vlhkosti, označen písmenem W).

Odpad jako palivo je schopno samostatného hoření jen v případě, obsahuje-li dostatečný podíl hořlavé složky. Nastane-li situace, kdy se významně zvýší obsah nespalitelných částí paliva – popela a vlhkosti, může dojít k tomu, že takové palivo není schopno se samostatně rozhořet, protože teplo uvolňující se hořlavinou je nedostatečné pro odpaření vlhkosti paliva a k ohřátí popelovin na teplotu spalování. V tomto případě je zapotřebí přivádět další podpurné palivo, stabilizační palivo. [4]

4.3 Výhody a nevýhody spalování

Výhody:

- snížení objemu odpadů na 10-15 % objemu původního, oproti jiným metodám (kompostování nebo skládkování) je snížení o dost výraznější;
- pro mnoho typů odpadů (chemické, zdravotní) je to jediný způsob zneškodňování;
- využití uvolněného tepla ze spalování (výroba páry, teplé užitkové vody);
- nejrychlejší zneškodňování odpadů.

Nevýhody:

- vysoké náklady na výstavbu spaloven;
 - vysoké náklady na provoz a údržbu zařízení;
 - potřeba kvalifikovaného personálu;
 - komplikace s možnostmi využití vyrobeného tepla;
 - destrukce odpadních látek, které by mohly být recyklovatelné;
 - nutnost nákladných opatření k zábraně tvoření emisí proudících do ovzduší a vody.
- [4]

4.4 Zařízení vhodná ke spalování kapalných odpadů

4.4.1 Bubnové rotační pece

Jako základ bubnových rotačních pecí se považuje vyzděný ocelový válec o průměru 1 až 4 metrů a délce až 12 metrů. Tento buben je otočný kolem své podélné osy, která je mírně skloněna od horizontální roviny 5° až 7°. V předním čele pece je umístěn zapalovací hořák (v některých případech i stabilizační) a násypka, která slouží pro přívod odpadu. Na druhé straně je odvod tuhých zbytků. V reakčním prostoru bývá teplota většinou mezi 800 °C až 1200 °C, u speciálně konstruovaných rotačních pecí můžou teploty dosahovat až 1400 °C. Jedná se například o speciální pec typu O'Connor, která je chlazená pomocí trubkových vestaveb, což tedy umožňuje provádět spalovací proces při vyšších teplotách. Plášť této pece je tvořen trubkami, které jsou svařené v pravidelných roztečích a ústících do sběrných prstenců. Pro ohřev spalovacího vzduchu slouží mezery mezi trubkami a napájecí voda se ohřívá v trubkovém svařenci stejně jako v ekonomizéru pro navazující kotel. Teplota na konci pece je až 1400 °C. Odpad z pece putuje na dohořivací rošt, kde dochází k dohořívání paliva.

Bubnové rotační pece můžeme považovat za univerzální zařízení sloužící ke spalování odpadů, ve kterém je možno spalovat veškeré druhy průmyslových odpadů. V tomto agregátu se můžou spalovat i komunální odpady, kaly, kapalné i pevné odpady.

Výhody bubnových rotačních pecí:

- dobré přehrnování odpadů
- mísení odpadů
- přístup spalovacího vzduchu
- přenos tepla sáláním a konvekcí
- zvýšené reakční teploty

Regulace procesu spalování se provádí změnou otáček. Tím se také přizpůsobuje pec různým druhům odpadu. Doba spalování se pohybuje běžně v rozmezí 1 až 2 hodin. [4]

4.4.2 Muflové pece

Jsou to bezroštové pece. Odpad je uložen na nístěji, která je ve tvaru vany. Odpad může být ukládán také na keramickou desku s vaničkovým provedením, která je zespodu topena. Odpad je přiváděn buď vrchním vhozen, nebo přes boční vhazovací šachtu. Do spalovacího prostoru ústí stabilizační hořák, jenž současně slouží pro spalování kapalných odpadů. Spalováním odpadních látek vzniknou spaliny, které proudí do komory, kde dochází k dodatečnému spalování za pomoci automatického hořáku. V této komoře se dospalují nespálené částičky. Spalování probíhá periodicky. Odpad se nejdříve dopraví do zchlazené prázdné pece. Po uzavření otvorů se pec zahřeje na potřebnou teplotu a to za pomoci stabilizačního hořáku. Spalování odpadu bývá za teplot většinou v rozmezí 800-1000 °C. Po dokončení spalovacího procesu se pec ochladí a vyhrábne se škvára (popel), po té je pec připravena na další dávku odpadů. Muflové pece jsou určené pro spalování různých olejových kalů, rozpouštědel, zbytků z výroby barev a kalů apod. [4]

4.4.3 Fluidní pece

Princip fluidního termického zneškodnění odpadů je možné použít jak pro kapalné, tak i pro pevné odpady. Spalovací vzduch je velkou rychlostí vháněn ze spodní části komory do zrnitého odpadu. Tím dojde k nadnášení a rozvíření jednotlivých zrn. Vzniká tak fluidní vrstva a zvětšuje se reakční povrch. K intenzivnímu průběhu spalování dochází v celé vrstvě při teplotě 800 °C až 1000 °C.

Spalování ve fluidní peci je vhodné pro hořlavé látky, které mají vyšší obsah síry. A to proto, že produkty spalování mohou být zachyceny mletým vápnem nebo vápencem, jež jsou současně přiváděny se spalovacím odpadem. Velkou výhodou fluidního ohniště je konstrukční jednoduchost. [4]

4.4.4 Prostorové pece

Tyto pece se používají především v chemickém průmyslu. Jsou tvořeny spalovací komorou o velkém objemu. Komora může být uložena svisle, nebo vodorovně. V ní je rozprašován a poté spalován kapalný odpad a to za teplot 900 °C až 1200 °C. Reakční (spalovací) komora se musí trvale přitápět, pokud není dostatečná výhřevnost odpadu

(např. odpady s vyšším obsahem vlhkosti) a pro spálení nestačí stabilizační hořák, aby palivo dohořelo samo. Na spalovací komoru navazuje dohořívací (dodatečná) komora. Ta může navazovat na spalovací komoru ve stejném prostoru nebo může být umístěna samostatně. [4]

5 NÁVRH SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

5.1 Koncepce návrhu

Během návrhu spalovacího zařízení jsem vycházel zejména ze zadaného jmenovitého výkonu, druhu a tedy vlastností spalovaného odpadu. Pro jmenovitý výkon $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, kapalný odpad s vysokou výhřevností a větším obsahem chloru a dioxinů, tedy látek na bázi PCB, použiji válcovou prostorovou pec osazenou jedním kalovým hořákem. Požadované teploty a setrvání spalin při této teplotě je dosaženo v dohořivací komoře se stabilizačním hořákem na lehký topný olej.

Spalovací komora je samostatné válcové těleso, jehož součástí je žáruvzdorná vyzdívka s tepelnou izolací. V čelní stěně spalovací komory je umístěn hořák na spalování kapalných odpadů MAIOR P60 o výkonu 415 kW. Součástí hořáku je dávkovač kapalného odpadu.

Směšovač je určen k propojení spalovací a dohořivací komory. Obsahuje systém tangenciálních trysek sekundárního vzduchu, který slouží k dokonalému promíšení spalin před vstupem do dohořivací komory. Směšovač je také opatřen žáruvzdornou vyzdívkou s izolací.

Dohořivací komora je kruhového průřezu s tangenciálním vstupem spalin. Ve spodní části komory je umístěn dohořivací hořák s automatickou regulací na lehký topný olej, který zajišťuje předepsanou teplotu spalin v dohořivací komoře. Rovněž se tato komora skládá ze žáruvzdorných a izolačních tvarovek, další vrstvu tvoří minerální vlna a ocelový plášť. Výhodou válcové komory je umístění hořáku a vstupu spalin do komory, což zajišťuje dostatečné dlouhé setrvání spalin v dohořivací komoře, další výhodou je jednoduchá koncepce návrhu.

Detaily spalovací a dohořivací komory jsou uvedeny na výkrese MP-001-2015, který je součástí přílohy.

Havarijní klapka slouží v případě havárie k odvodu tepla z vyzdívek a je umístěna za dohořivací komorou.

Ventilátory primárního a sekundárního vzduchu jsou dva samostatně regulovatelné radiální ventilátory typu VORTICENT C 25/2. Příkon ventilátorů je 470 W, maximální

množství dodávaného vzduchu je $1060 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Primární a sekundární vzduch bude odebírán z venkovního prostoru spalovny. [5]

Technologie spalování kapalného odpadu – součástí je zásobní nádrž s nuceným mícháním obsahu proto, aby nedocházelo za provozu k nadměrné separaci olejů a vody. Ze zásobní nádrže (objem 15 000 l) je plněna denní nádrž s objemem 1 000 l, ze které kapalný odpad proudí pomocí oběhové smyčky do kalového hořáku. Oběhová smyčka i denní nádrž jsou vyhřívány. Denní nádrž na lehký topný olej má stejně jako nádrž na odpad obsah 1 000 l. Do kalového hospodářství se také zahrnují filtry pro zachycení hrubých i jemných nečistot obsažených v odpadu, dávkovací čerpadla odpadu a stabilizačního paliva, řídicí a regulační prvky.

5.2 Výpočet

Údaje potřebné pro výpočet:

Jmenovitý výkon.....	80	[kg · h ⁻¹]
Výhřevnost odpadu	40	[MJ] · kg ⁻¹
Obsah síry v odpadu	2	[%]
Obsah vodíku v odpadu	14	[%]
Maximální obsah vody v odpadu.....	2	[%]
Maximální obsah chloru v odpadu.....	2,5	[%]
Výhřevnost stabilizačního paliva.....	40	[MJ] · kg ⁻¹
Maximální obsah vody ve stabilizačním palivu	0,5	[%]

5.2.1 Spalování odpadu

Teoretické množství spalovacího vzduchu pro odpad:

$$V_{\text{vzd,min}}^0 = \frac{0,263}{1000} \cdot Q_i^0 + 0,007 \cdot W^0 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.1)$$

Q_i^0 výhřevnost odpadu [kJ¹ · kg⁻¹]

W^0 ...obsah vody v odpadu [%]

$$V_{\text{vzd,min}}^0 = \frac{0,263}{1000} \cdot 40000 + 0,007 \cdot 2 = 10,53 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu pro odpad:

$$V_{\text{vzd}}^0 = V_{\text{vzd,min}}^0 \cdot n^0 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.2)$$

n^0 ...přebytek vzduchu pro odpad [1]

Celkový přebytek vzduchu pro kapalný odpad je podle Obroučka [4] max. 100 %.
Volím $n^0 = 2$.

$$V_{\text{vzd}}^0 = 10,53 \cdot 2 = 21,06 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Rozdíl mezi objemem spalín a spalovacího vzduchu:

$$\Delta V^0 = \frac{0,0287}{1000} \cdot Q_i^0 - 0,48 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.3)$$

$$\Delta V^0 = \frac{0,0287}{1000} \cdot 40000 - 0,48 = 0,67 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkých spalín z odpadu:

$$V_{\text{sp,sk}}^0 = V_{\text{vzd}}^0 + \Delta V^0 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.4)$$

$$V_{\text{sp,sk}}^0 = 21,06 + 0,67 = 21,73 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Celkové množství vlhkých spalín z odpadu pro daný výkon spalovny:

$$V_{\text{sp,celk}}^0 = m^0 \cdot V_{\text{sp,sk}}^0 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.5)$$

$$m^0 \dots \text{jmenovitý výkon spalovny} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$V_{\text{sp,celk}}^0 = 80 \cdot 21,73 = 1738,4 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$V_{\text{sp,celk}}^0 = 0,483 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Tepelný výkon odpadu:

$$P^0 = m^0 \cdot Q_i^0 \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.6)$$

$$P^0 = 80 \cdot 40 = 3200 \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$P^0 \approx 890 \quad [\text{kW}]$$

5.2.2 Spalování stabilizačního paliva

Teoretické množství spalovacího vzduchu pro stabilizační palivo:

$$V_{\text{vzd,min}}^s = \frac{0,263}{1000} \cdot Q_i^s + 0,007 \cdot W^s \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$Q_i^s \dots \text{výhřevnost stabilizačního paliva} \quad [\text{kJ}^1 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$W^s \dots \text{obsah vody ve stabilizačním palivu} \quad [\%]$$

$$V_{\text{vzd,min}}^s = \frac{0,263}{1000} \cdot 40000 + 0,007 \cdot 0,5 = 10,52 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu pro stabilizační palivo:

$$V_{\text{vzd}}^s = V_{\text{vzd,min}}^s \cdot n^s \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$n^s \dots \text{přebytek vzduchu pro stabilizační palivo} \quad [1]$$

Celkový přebytek vzduchu pro kapalná paliva je podle Obroučka [4] max. 30 %.
Volím $n^s = 1,3$.

$$V_{\text{vzd}}^s = 10,52 \cdot 1,3 = 13,7 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Rozdíl mezi objemem spalin a spalovacího vzduchu:

$$\Delta V^s = \frac{0,0287}{1000} \cdot Q_i^o - 0,48 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\Delta V^s = \frac{0,0287}{1000} \cdot 40000 - 0,4 = 0,67 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkých spalin z odpadu:

$$V_{\text{sp,sk}}^s = V_{\text{vzd}}^s + \Delta V^s \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{sp,sk}}^s = 13,7 + 0,67 = 14,4 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

5.2.3 Určení výkonu hořáků

Spalovací komora, stechiometrické spalování, $n_{\text{sk}}=1$:

$$V_{\text{vzd,sk}} = m_o \cdot V_{\text{vzd, min}}^o \cdot n_{\text{sk}} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.7)$$

$$V_{\text{vzd,sk}} = 80 \cdot 10,53 \cdot 1 = 842,4 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

Dohořivací komora, přebytek vzduchu 120 % (jako pro 25 % odpadu), $n_{\text{dk}}=2,2$:

$$V_{\text{vzd,dk}} = m_o \cdot V_{\text{vzd, min}}^o \cdot n_{\text{dk}} \cdot 0,25 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.8)$$

$$V_{\text{vzd,dk}} = 80 \cdot 10,53 \cdot 2,2 \cdot 0,25 = 463,3 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

Celkové množství vzduchu, celkový přebytek vzduchu, $n_c=2$:

$$V_{vzd, celk} = m_o \cdot V_{vzd, min}^o \cdot n_c \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.9)$$

$$V_{vzd, celk} = 80 \cdot 10,53 \cdot 2 = 1684,8 \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}]$$

$$V_{vzd, sk+dk} = V_{vzd,sk} + V_{vzd,dk} \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.10)$$

$$V_{vzd, sk+dk} = 842,4 + 463,3 = 1305,7 \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}]$$

Množství vzduchu přiváděného do směšovače:

$$V_{vzd, SM} = V_{vzd, celk} - V_{vzd, sk+dk} \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.11)$$

$$V_{vzd, SM} = 1684,8 - 1305,7 = 379,1 \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}]$$

Zapalovací hořák

Aby se zaručilo vyhřátí spalovací komory z 20 °C na 700 °C, musí být výkon spalovacího hořáku dostatečně velký. Teplotu spalovacího vzduchu uvažují 20 °C. Díky přehřevu spalovacího vzduchu bude ve skutečnosti tato teplota v reakční komoře vyšší. Údaje fyzikálních veličin spalovacího vzduchu a spalín paliva a odpadu při určitých teplotách čerpám z literatury Hašek [6] a Rédr [7].

$$0 \text{ °C} = 273 \text{ K}$$

$$E_{1, 20} = V_{vzd, sk+dk} \cdot c_{vzd} \cdot T_{vzd} \quad [MJ \cdot h^{-1}] \quad (5.12)$$

$$E_{1, 20} = 1305,7 \cdot 1,29 \cdot 293 = 493,52 \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$E_{2, 700} = V_{sp} \cdot c_{sp} \cdot T_{sp} \quad [MJ \cdot h^{-1}] \quad (5.13)$$

$$E_{2, 700} = 1305,7 \cdot 1,5 \cdot 973 = 1905,7 \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$c_{vzd} \dots \text{měrná tepelná kapacita vzduchu} \quad [kJ \cdot m_N^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{sp} \dots \text{měrná tepelná kapacita spalín} \quad [kJ \cdot m_N^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$T_{vzd} \dots \text{teplota vzduchu} \quad [°C]$$

$$T_{sp} \dots \text{teplota spalín} \quad [°C]$$

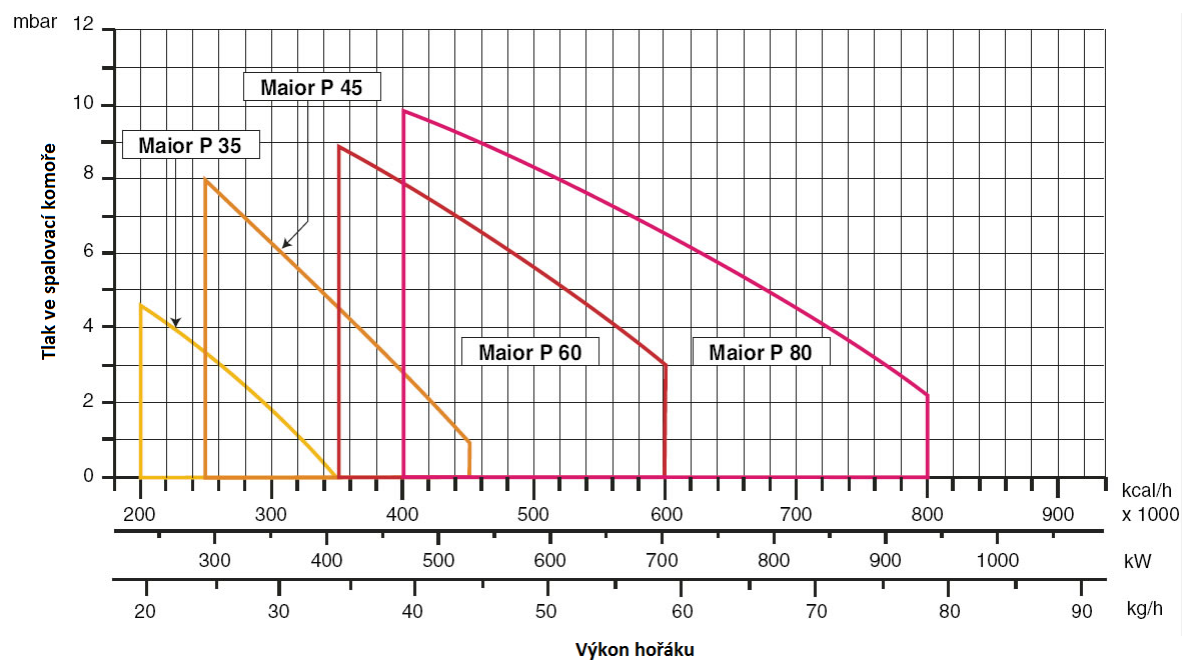
Výkon zapalovacího hořáku:

$$N_1 = E_{2, 700} - E_{1, 20} \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.14)$$

$$N_1 = 1905,7 - 493,52 = 1412,2 \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$N_1 \approx 392 \quad [\text{kW}]$$

Volím hořák MAIOR P60 o výkonu 415 kW. Technické parametry tohoto hořáku jsou uvedeny v *Příloze D*. Charakteristika hořáku je zobrazena na obrázku č. 5-1. [8]



Obrázek 5-1: Charakteristika hořáku MAIOR P60 [8]

Potřeba lehkého topného oleje pro dosažení teploty 700 °C:

$$V_{p,sk} = \frac{N_{1,sk}}{Q_i^p} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.15)$$

$$V_{p,sk} = \frac{1494}{40} = 37,3 \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Dohořivací hořák

V dohořivací komoře musí být dodržena minimální předepsaná teplota, k tomu slouží dohořivací hořák. Pro odpady, které obsahují nebezpečné látky PCB podle zákona č. 201/2012 Sb. je minimální předepsaná teplota 1200 °C.

$$E_{3, 700} = V_{sp} \cdot c_{sp} \cdot T_{sp} \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$E_{3, 700} = 1684,8 \cdot 1,5 \cdot 973 = 2459 \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$E_{4, 1200} = V_{sp} \cdot C_{sp} \cdot T_{sp} \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$E_{4, 1200} = 1684,8 \cdot 1,65 \cdot 1473 = 4095 \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

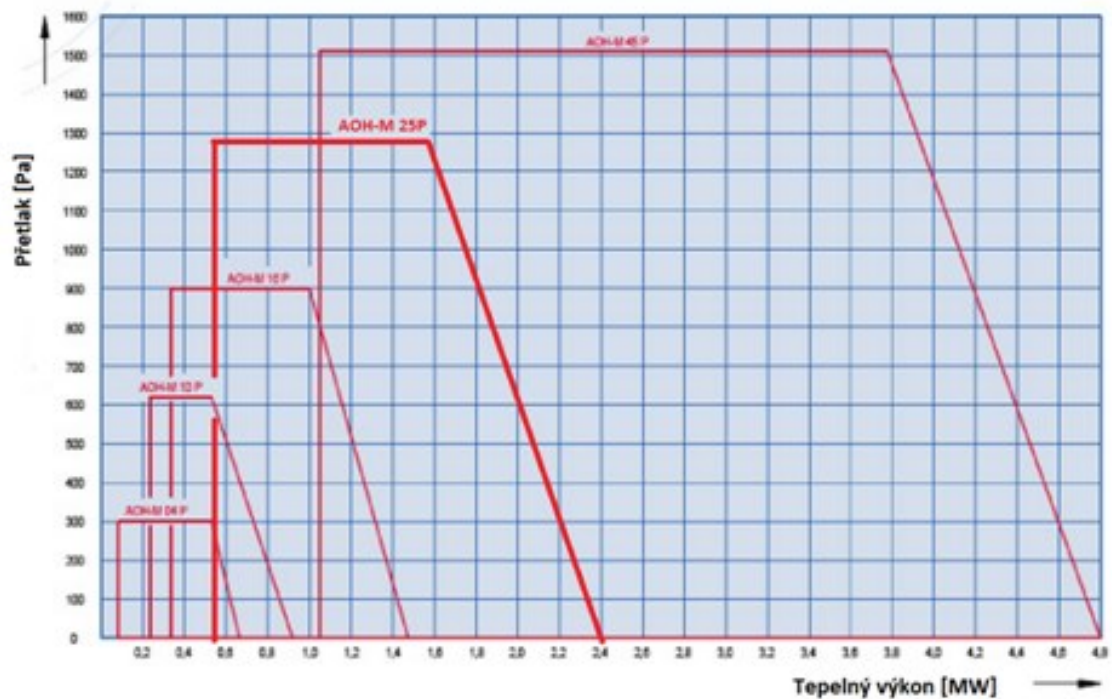
Výkon dopalovacího hořáku:

$$N_2 = E_{3, 700} - E_{4, 1200} \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$N_2 = 4095 - 2459 = 1636 \quad [MJ \cdot h^{-1}]$$

$$N_2 \approx 455 \quad [kW]$$

Volím hořák na kapalná paliva (lehkého topného oleje) AOH-M 25PL výrobce PBS Třebíč a. s. o výkonu 545 kW. Charakteristika tohoto hořáku je zobrazena na obrázku č. 5-2. Spotřeba lehkého topného oleje je 46,4 kg/h. Technické parametry hořáku jsou uvedeny v *Příloze E*. Rozměrové parametry jsou uvedeny v *Příloze F*. [9]



Obrázek 5-2: Charakteristika hořáku AOH-M 25PL [9]

Tepelný výkon z paliva:

$$N_k^p = m^p \cdot Q_i^p \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.16)$$

$$N_k^p = 46,4 \cdot 40 = 1856 \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Celkový tepelný výkon v dopalovací komoře:

$$N_k^c = N_k^o + N_k^p \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.17)$$

$$N_k^c = 3200 + 1856 = 5056 \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$N_k^c \approx 1404 \quad [\text{kW}]$$

Celkové množství vlhkých spalín z paliva pro daný výkon hořáku:

$$V_{sp,celk}^p = m^p \cdot V_{sp,sk}^p \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.18)$$

$$V_{sp,celk}^p = 46,4 \cdot 14,4 = 668,16$$

Celkové množství vlhkých spalín:

$$V_{sp, celk} = V_{sp,celk}^o + V_{sp,celk}^p \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.19)$$

$$V_{sp, celk} = 1738,4 + 668,16 = 2406,56 \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}]$$

$$V_{sp, celk} = 0,67 \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}]$$

5.2.4 Rozměry spalovací komory

Výpočty provádím pro teplotu 1000 °C. Při teplotě 1100 °C dojde k zastavení přívodu odpadu pomocí regulace.

Skutečné množství vlhkých spalín:

$$V_{sp,sk,s} = V_{sp,celk} \cdot \frac{T_{sk,max}}{T_N} \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.20)$$

$$V_{sp,sk,s} = 1738,4 \cdot \frac{1273}{273} = 8106,16 \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}]$$

$$V_{sp,sk,s} = 2,25 \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}]$$

Objem spalovací komory:

$$V_{sk} = 2,25 \quad [m^3]$$

Průměr spalovací komory (bez vyzdívky):

$$d_{sk} = 1 \quad [m]$$

Délka spalovací komory (bez vyzdívky):

$$l_{sk} = \frac{4 \cdot V_{sk}}{\pi \cdot d_{sk}^2} \quad [m] \quad (5.21)$$

$$l_{sk} = \frac{4 \cdot 2,25}{\pi \cdot 1^2} = 2,866 \quad [m]$$

$$\text{Délku navrhuji } l_{sk} = 3 \quad [m]$$

Skutečný objem spalovací komory:

$$V_{sk} = \frac{\pi \cdot d_{sk}^2}{4} \cdot l_{sk} \quad [m^3] \quad (5.22)$$

$$V_{sk} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} \cdot 3 = 2,35 \quad [m^3]$$

Průřez spalovací komory:

$$S_{sk} = \frac{\pi \cdot d_{sk}^2}{4} \quad [m^2] \quad (5.23)$$

$$S_{sk} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,79 \quad [m^2]$$

Průměrná rychlost spalín ve spalovací komoře:

$$w_{sp,sk} = \frac{V_{sp,sk,s}}{S_{sk}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.24)$$

$$w_{sp,sk} = \frac{2,25}{0,79} = 2,85 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Zdržení spalín ve spalovací komoře:

$$\tau_{sk,s} = \frac{l_{sk}}{w_{sp,sk}} \quad [s] \quad (5.25)$$

$$\tau_{sk,s} = \frac{3}{2,85} = 1,05 \quad [s]$$

5.2.5 Rozměry dohořívací komory

Skutečné množství vlhkých spalín při teplotě 1200 °C:

$$V_{sp,dk,s} = V_{sp,celk} \cdot \frac{T_{dk}}{T_N} \quad [m \cdot h^{-1}]$$

$$V_{sp,dk,s} = 2406,56 \cdot \frac{1473}{273} = 12985 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$V_{sp,dk,s} = 3,6 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Objem dohořívací komory:

Minimální doba pro setrvání spalín v dohořívací komoře pro teplotu 1200 °C je podle zákona č. 201/2012 Sb. dvě sekundy.

$$V_{dk} = \tau_{dk} \cdot V_{sp,dk,s} \quad [m^3] \quad (5.26)$$

$$V_{dk} = 2,5 \cdot 3,6 = 9 \quad [m^3]$$

Průměr dohořivací komory (bez vyzdívky):

$$\text{Volím } d_{dk} = 1,5 \quad [\text{m}]$$

Délka dohořivací komory (bez vyzdívky):

$$l_{dk} = \frac{4 \cdot V_{dk}}{\pi \cdot d_{dk}^2} \quad [\text{m}]$$

$$l_{dk} = \frac{4 \cdot 9}{\pi \cdot 1,5^2} = 5,09 \quad [\text{m}]$$

Navrhuji délku $l_{dk} = 5,5 \text{ m}$

Skutečný objem dohořivací komory:

$$V_{dk} = \frac{\pi \cdot d_{dk}^2}{4} \cdot l_{dk} \quad [\text{m}^3]$$

$$V_{dk} = \frac{\pi \cdot 1,5^2}{4} \cdot 5,5 = 9,72 \quad [\text{m}^3]$$

Průřez dohořivací komory:

$$S_{dk} = \frac{\pi \cdot d_{dk}^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

$$S_{dk} = \frac{\pi \cdot 1,5^2}{4} = 1,77 \quad [\text{m}^2]$$

Průměrná rychlost spalin v dohořivací komoře:

$$w_{sp,dk} = \frac{V_{sp,dk,s}}{S_{dk}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$w_{sp,dk} = \frac{3,6}{1,77} = 2,03 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kontrola doby zdržení spalin:

$$\tau_{dk,s} = \frac{l_{dk}}{w_{sp,dk}} \quad [\text{s}]$$

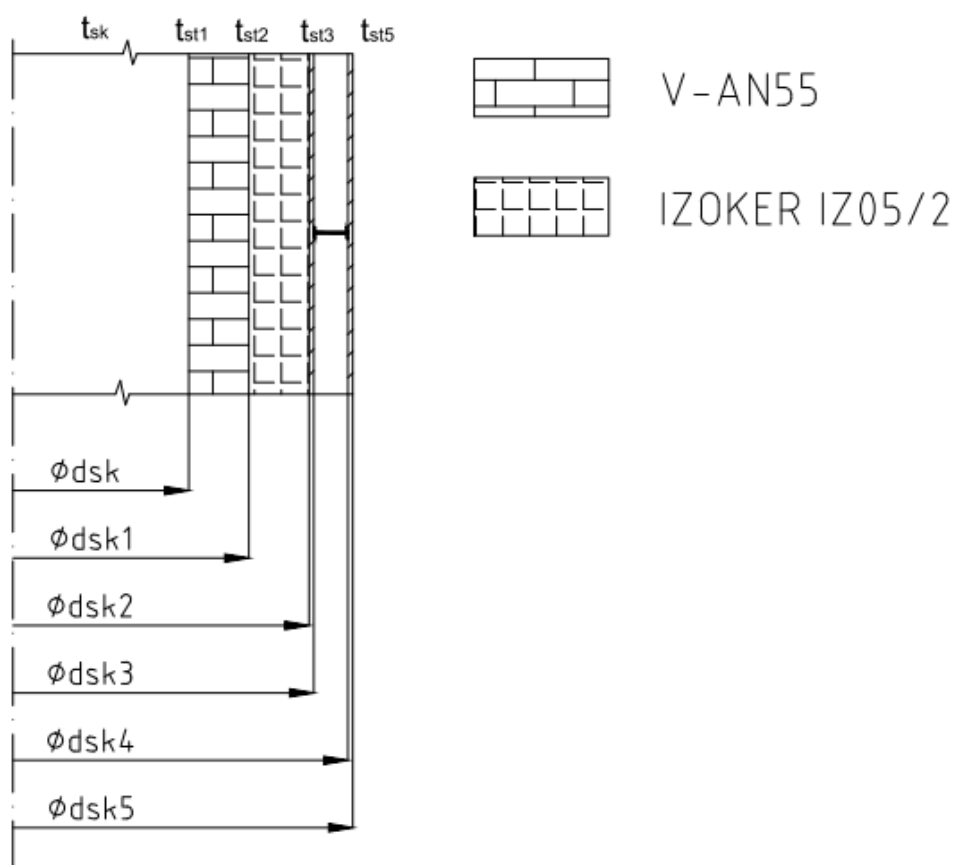
$$\tau_{dk,s} = \frac{5,5}{2,03} = 2,7 \quad [\text{s}]$$

Podmínka doby setrvání spalin v dohořivací komoře byla splněna, protože zdržení spalin při lineárním proudění bude 2,17 s.

5.2.6 Návrh vyzdívek

Vyzdívky spalovací komory

Vyzdívková spalovací komora je složena ze žáruvzdorné vrstvy z hlinitých tvarovek na bázi andaluzitu V-AN55, jež jsou žáruvzdorné do 1780 °C. Další vrstvou je izolační IZOKER IZ05/2. Následuje vnitřní ocelový plášť, vzduchová mezera a vnější ocelový plášť. Materiály vyzdívek jsou z firmy KERAVIT zabývající se speciálními materiály použité pro spalovny odpadů. Technické parametry použitých materiálů jsou uvedeny v *Přílohách G a H*. Jelikož je mým cílem celkový projekční návrh spalovny, místo detailního řešení spalovací a dohořivací komory se omezují jen na zjištění teploty povrchů reakčních pecí. Tloušťky vyzdívek navrhuji 125 mm a ocelových plášťů 100 mm. Průměry a umístění vyzdívek včetně vzduchové mezery je znázorněno na obrázku č. 5-3. [10]



Obrázek 5-3: Schematické znázornění stěny spalovací komory [vlastní tvorba]

Výpočet součinitele přestupu tepla konvekci

Teplotu ve spalovací komoře pro následující výpočet uvažuji 1000 °C. Fyzikální vlastnosti spalín pro danou teplotu jsem odečetl z Hašek [6]. Veškerý postup výpočtu provádím podle Kadlec [11] a Toman [12].

$$Re_{sk} = \frac{w_{sp,sk} \cdot d_{sk}}{v_{sp,sk}} \quad [1] \quad (5.27)$$

$$Re_{sk} = \frac{2,85 \cdot 1}{168,52 \cdot 10^{-6}} = 16912 \quad [1]$$

$Re_{sk} > 10000$, jedná se o turbulentní proudění

$$Nu_{sk} = 0,021 \cdot Re_{sk}^{0,8} \cdot Pr_{sk}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{sk}}{Pr'_{sk}}\right)^{0,25} \quad [1] \quad (5.28)$$

$$Nu_{sk} = 0,021 \cdot 16912^{0,8} \cdot 0,6124^{0,43} \cdot 1 = 41,04 \quad [1]$$

$$\alpha_{k,sk} = \frac{Nu \cdot \lambda_{sp,sk}}{d_{sk}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.29)$$

$$\alpha_{k,sk} = \frac{41,04 \cdot 0,102}{1} = 4,18 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Je nutná korekce na délku, podle Rédr [7] je hodnota korekčního součinitele pro daný poměr rozměrů komory $\varepsilon = 1,38$.

$$\frac{L_{sk}}{d_{sk}} = \frac{3}{1} = 3 < 50$$

$$\alpha_{k,sk'} = \alpha_{k,sk} \cdot \varepsilon \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.30)$$

$$\alpha_{k,sk'} = 4,18 \cdot 1,38 = 5,77 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$Nu \dots \dots \dots \text{Nusseltovo kritérium} \quad [1]$$

$$Re \dots \dots \dots \text{Reynoldsovo kritérium} \quad [1]$$

$$Pr \dots \dots \dots \text{Prandtlovo kritérium} \quad [1]$$

$$\lambda_{sp} \dots \dots \dots \text{tepelná vodivost spalín} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním

Řešení sálání tříatomového plynu podle Toman [12]

Efektivní délka paprsku:

$$l_{ef} = \eta_p \cdot d_{sk} \quad [m] \quad (5.31)$$

$$l_{ef} = 0,8 \cdot 1 = 0,8 \quad [m]$$

Poměrná pohltivost spalin:

$$\varepsilon_{sp,sk} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{SO_2} \quad [1] \quad (5.32)$$

ε_{sp}poměrná pohltivost dané složky spalin

βkorekční součinitel pro vodní páru

η_psoučinitel efektivnosti sálání plynů

Podle Toman [12] $\eta_p = (0,8-0,9)$

$$\varepsilon_{sp,sk} = 0,08 + 1,01 \cdot 0,03 + 0,04 = 0,15 \quad [1]$$

Pohltivost stěny:

$$\varepsilon_{sk} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st,sk}} + \frac{1}{\varepsilon_{sp,sk}} - 1} \quad [1] \quad (5.33)$$

$$\varepsilon_{sk} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,15} - 1} = 0,145 \quad [1]$$

ε_{st}poměrná pohltivost stěny

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_{s,sk} = \frac{\varepsilon_{sk} \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_{sk}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{st,sk}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{sk} - t_{st1,sk})} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.34)$$

$$\alpha_{s,sk} = \frac{0,145 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1244}{100} \right)^4 \right]}{1000 - 971} = 65,56 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

C_osoučinitel sálení absolutně černého tělesa $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

T_{sk}absolutní teplota spalín ve spalovací komoře $[K]$

$T_{st,sk}$absolutní teplota vnitřního povrchu žáruvzdorné vrstvy spalovací komory $[K]$

Celkový součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_{sk} = \alpha_{k,sk'} + \alpha_{s,sk} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.35)$$

$$\alpha_{sk} = 5,77 + 65,56 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Prostup tepla válcovou stěnou:

$$q_{sk} = \frac{\pi \cdot (t_{sk} - t_{vzd})}{\frac{1}{\alpha_{sk} \cdot d_{sk}} + \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_{sk1}} \cdot \ln \frac{d_{sk1}}{d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{sk2}} \cdot \ln \frac{d_{sk2}}{d_{sk1}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{oc}} \cdot \ln \frac{d_{sk3}}{d_{sk2}} \right) + \frac{1}{\alpha_{vzd} \cdot d_{sk3}}} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5.36)$$

$$q_{sk} = \frac{\pi \cdot (1000 - 20)}{\frac{1}{71,33 \cdot 1} + \left(\frac{1}{2 \cdot 1,69} \cdot \ln \frac{1,25}{1} + \frac{1}{2 \cdot 0,19} \cdot \ln \frac{1,5}{1,25} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{1,52}{5} \right) + \frac{1}{12 \cdot 1,52}}$$

$$q_{sk} = 5008 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

λ_otepelná vodivost ocelového plechu, [6] $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Určení teplot jednotlivých vrstev vyzdívky:

$$t_{st1,sk} = t_{sk} - \frac{q_{sk}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{sk} \cdot d_{sk}} \quad [^{\circ}C] \quad (5.37)$$

$$t_{st1,sk} = 1000 - \frac{5008}{\pi} \cdot \frac{1}{71,33 \cdot 1} = 978 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st2,sk} = t_{sk} - \frac{q_{sk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{sk} \cdot d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{sk1}} \cdot \ln \frac{d_{sk1}}{d_{sk}} \right) \quad [^{\circ}C] \quad (5.38)$$

$$t_{st2,sk} = 1000 - \frac{5008}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{71,33 \cdot 1} + \frac{1}{2 \cdot 1,69} \cdot \ln \frac{1,25}{1} \right) = 872 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st3,sk} = t_{sk} - \frac{q_{sk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{sk} \cdot d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{sk1}} \cdot \ln \frac{d_{sk1}}{d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{sk2}} \cdot \ln \frac{d_{sk2}}{d_{sk1}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{oc}} \cdot \ln \frac{d_{sk3}}{d_{sk2}} \right) \quad [^{\circ}C] \quad (5.39)$$

$$t_{st3,sk} = 1000 - \frac{5008}{\pi} \left(\frac{1}{71,33 \cdot 1} + \frac{1}{2 \cdot 1,69} \cdot \ln \frac{1,25}{1} + \frac{1}{2 \cdot 0,19} \cdot \ln \frac{1,5}{1,25} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{1,52}{1,5} \right)$$

$$t_{st3,sk} = 107 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplota povrchu svrchního pláště:

Podle Toman [12] platí pro dané pláště pece, mezi kterými probíhá sálání, tyto vztahy:

$$\alpha_{s,p,sk} = \frac{\varepsilon_p \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_{st3,sk}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{st4,sk}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{st3,sk} - t_{st4,sk})} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\alpha_{s,p,sk} = \frac{0,7 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{380}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right]}{(107 - 20)} = 6,15 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

ε_ppoměrná pohltivost ocelových plechů

Podle Toman [12] je poměrná pohltivost ocelových plechů rovna hodnotě 0,7.

$$q_{p,sk} = \frac{\pi \cdot (t_{st3,sk} - t_{vzd})}{\frac{1}{\alpha_{s,p,sk} \cdot d_{sk3}} + \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_{vzd}} \cdot \ln \frac{d_{sk4}}{d_{sk3}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{oc}} \cdot \ln \frac{d_{sk5}}{d_{sk4}} \right) + \frac{1}{\alpha_{vzd} \cdot d_{sk5}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.40)$$

$$q_{p,sk} = \frac{\pi \cdot (107 - 12)}{\frac{1}{6,15 \cdot 1,52} + \left(\frac{1}{2 \cdot 0,03} \cdot \ln \frac{1,58}{1,52} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{1,6}{1,58} \right) + \frac{1}{12 \cdot 1,6}} = 339,76 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$t_{st5,sk} = t_{st3,sk} - \frac{q_{p,sk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{s,pk} \cdot d_{sk3}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{vzd}} \cdot \ln \frac{d_{sk4}}{d_{sk3}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{oc}} \cdot \ln \frac{d_{sk5}}{d_{sk4}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.41)$$

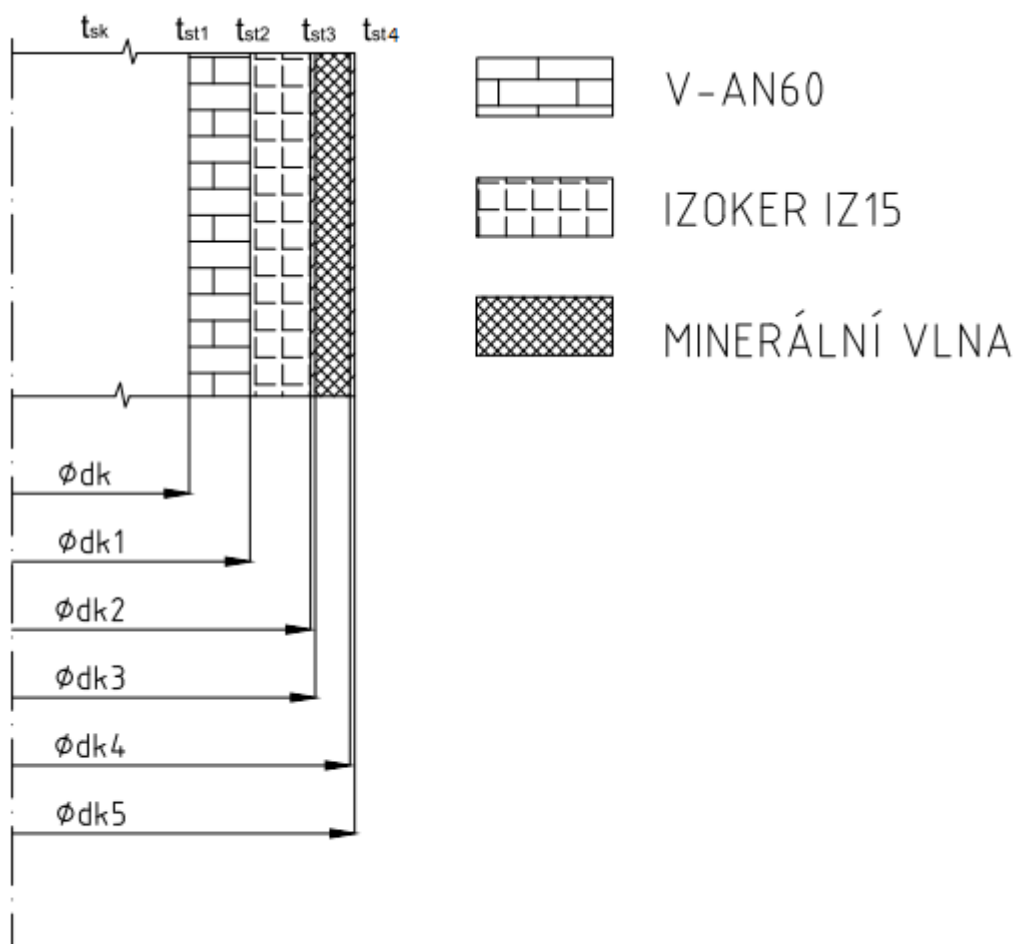
$$t_{st5,sk} = 107 - \frac{339,76}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{6,15 \cdot 1,52} + \frac{1}{2 \cdot 0,03} \cdot \ln \frac{1,58}{1,52} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{1,6}{1,58} \right)$$

$$t_{st5,sk} = 25,63 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Dle výpočtů je teplota svrchního pláště 25,6 °C. Ve vzduchové mezeře mezi oběma plášti je průměrná teplota 66°C. Žádná z teplot v jednotlivých vrstvách stěny spalovací komory nepřekračuje max. hodnoty pro použití navržených materiálů.

Vyzdívky dohořivací komory

Tak jako u spalovací komory, použijí u dohořivací komory žáruvzdornou vrstvu materiálu s tvarovkami z vysoce hlinitého materiálu, jež jsou na bázi andaluzitu. Se žáruvzdorností do 1820 °C použijí materiál V-AN60. Izolační vrstvu IZOKER IZ15 do 1200°C. Technické parametry jsou uvedeny v *Přílohách H a G*. Následuje vnitřní ocelový plášť (10 mm), vrstva izolační minerální vlny (80 mm) a vnější ocelový plášť (10 mm). Tloušťku obou vrstev vyzdívky navrhuji 125 mm. Průměry a umístění vyzdívek včetně minerální vlny je znázorněno na obrázku č. 5-4.



Obrázek 5-4: Schematické znázornění stěny spalovací komory [vlastní tvorba]

Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí

$$Re_{dk} = \frac{w_{sp,dk} \cdot d_{dk}}{v_{sp,dk}} \quad [1]$$

$$Re_{dk} = \frac{2,03 \cdot 1,5}{212,81 \cdot 10^{-6}} = 14308,5 \quad [1]$$

$Re_{dk} > 10000$, jedná se o turbulettní proudění

$$Nu_{dk} = 0,021 \cdot Re_{dk}^{0,8} \cdot Pr_{dk}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{dk}}{Pr'_{dk}} \right)^{0,25} \quad [1]$$

$$Nu_{dk} = 0,021 \cdot 14308,5^{0,8} \cdot 0,603^{0,43} \cdot 1 = 35,66 \quad [1]$$

$$\alpha_{k,dk} = \frac{Nu \cdot \lambda_{sp,dk}}{d_{dk}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_{k,dk} = \frac{35,66 \cdot 0,116}{1,5} = 2,76 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\frac{l_{dk}}{d_{dk}} = \frac{5,5}{1,5} = 3,66 < 50$$

Je nutná korekce na délku, podle Rédr [7] je hodnota korekčního součinitele pro daný poměr rozměrů komory $\varepsilon = 1,39$.

$$\alpha_{k,dk'} = \alpha_{k,dk} \cdot \varepsilon \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_{k,dk'} = 2,76 \cdot 1,39 = 3,84 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním

Efektivní délka paprsku:

$$l_{ef} = \eta_p \cdot d_{dk} \quad [m]$$

$$l_{ef} = 0,8 \cdot 1,5 = 1,2 \quad [m]$$

Poměrná pohltivost spalin:

$$\varepsilon_{sp,dk} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{SO_2} \quad [1]$$

$$\varepsilon_{sp,dk} = 0,08 + 1,01 \cdot 0,02 + 0,02 = 0,12 \quad [1]$$

Hodnoty korekčního součinitele vodní páry a pohltivost spalín jsou odečteny pro teplotu 1200 °C z diagramů v Hašek [6].

Pohltivost stěny:

$$\varepsilon_{sp,dk} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st,dk}} + \frac{1}{\varepsilon_{sp,dk}} - 1} \quad [1]$$

$$\varepsilon_{sp,dk} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,12} - 1} = 0,116 \quad [1]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_{s,dk} = \frac{\varepsilon_{dk} \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_{dk}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{st,dk}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{dk} - t_{st1,dk})} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_{s,dk} = \frac{0,116 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{1373}{100} \right)^4 \right]}{1200 - 1100} = 75,9 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

T_{dk} absolutní teplota spalín v dohořívací komoře [K]

$T_{st,dk}$ absolutní teplota vnitřního povrchu žáruvzdorné vrstvy dopalovací komory [K]

Celkový součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_{dk} = \alpha_{k,dk} + \alpha_{s,dk} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_{dk} = 3,84 + 75,9 = 79,74 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Prostup tepla válcovou stěnou dohořívací komory:

$$Q_{dk} = \frac{\pi \cdot (t_{dk} - t_{vzd})}{\left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk1}} \cdot \ln \frac{d_{dk1}}{d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk2}} \cdot \ln \frac{d_{dk2}}{d_{dk1}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{OC}} \cdot \ln \frac{d_{dk3}}{d_{dk2}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{vl}} \cdot \ln \frac{d_{dk4}}{d_{dk3}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{OC}} \cdot \ln \frac{d_{dk5}}{d_{dk4}} \right)} + \frac{\pi \cdot (t_{dk} - t_{vzd})}{\frac{1}{\alpha_{dk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{\alpha_{vzd} \cdot d_{dk5}}} \quad [W \cdot m^{-2}]$$

q_{dk}

$$= \frac{\pi \cdot (1200 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 2,55} \cdot \ln \frac{1,75}{1,5} + \frac{1}{2 \cdot 0,77} \cdot \ln \frac{2}{1,75} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{2,02}{2} + \frac{1}{2 \cdot 0,05} \cdot \ln \frac{2,18}{2,02} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{2,2}{2,18}} + \frac{\pi \cdot (1200 - 20)}{\frac{1}{79,74 \cdot 1,5} + \frac{1}{12 \cdot 2,2}} = 4004,81 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

$\lambda_{vl} \dots \dots \dots$ tepelná vodivost izolační minerální vlny [6] $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Určení teplot jednotlivých vrstev vyzdívky:

$$t_{st1,dk} = t_{dk} - \frac{q_{dk}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{dk} \cdot d_{dk}} \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st1,dk} = 1200 - \frac{4004,81}{\pi} \cdot \frac{1}{79,74 \cdot 1,5} = 1189 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st2,dk} = t_{dk} - \frac{q_{dk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{dk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk1}} \cdot \ln \frac{d_{dk1}}{d_{dk}} \right) \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st2,dk} = 1200 - \frac{4004,81}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{79,74 \cdot 1,5} + \frac{1}{2 \cdot 2,55} \cdot \ln \frac{1,75}{1,5} \right) = 1151 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st3,dk} = t_{dk} - \frac{q_{dk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{dk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk1}} \cdot \ln \frac{d_{dk1}}{d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk2}} \cdot \ln \frac{d_{dk2}}{d_{dk1}} \right) \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st3,dk} = 1200 - \frac{4004,81}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{79,74 \cdot 1,5} + \frac{1}{2 \cdot 2,55} \cdot \ln \frac{1,75}{1,5} + \frac{1}{2 \cdot 0,77} \cdot \ln \frac{2}{1,75} \right)$$

$$t_{st3,dk} = 1040 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st4,dk} = t_{dk} - \frac{q_{dk}}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{dk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk1}} \cdot \ln \frac{d_{dk1}}{d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{dk2}} \cdot \ln \frac{d_{dk2}}{d_{dk1}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{OC}} \cdot \ln \frac{d_{dk3}}{d_{dk2}} \right) + \frac{q_{dk}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_{vl}} \cdot \ln \frac{d_{dk4}}{d_{dk3}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{OC}} \cdot \ln \frac{d_{dk5}}{d_{dk4}} \right) \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{st4,dk} = 1200 - \frac{4004,81}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{79,74 \cdot 1,5} + \frac{1}{2 \cdot 2,55} \cdot \ln \frac{1,75}{1,5} + \frac{1}{2 \cdot 0,77} \cdot \ln \frac{2}{1,75} \right) + \frac{4004,81}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{2,02}{2} + \frac{1}{2 \cdot 0,05} \cdot \ln \frac{2,18}{2,02} + \frac{1}{2 \cdot 46} \cdot \ln \frac{2,2}{2,18} \right) = 68 \quad [^{\circ}C]$$

Dle výpočtů je teplota svrchního pláště 68 °C. Žádná z teplot v jednotlivých vrstvách stěny spalovací komory nepřekračuje max. hodnoty pro použití navržených materiálů.

5.3 Návrh výměníku tepla

Výměník tepla musí být v provozu po celou dobu činnosti pece. Zajišťuje spalínám optimální teplotu pro vstup do ekobloku. Výkon je závislý na výhřevnosti a množství spalovaného odpadu.

5.3.1 Entalpická bilance výměníku tepla

Pro následující bilanci výměníku je vstupní teplota spalin 1200 °C. Výstupní teplota spalin je rovna vstupní teplotě do prvního stupně pračky spalin a to 250 °C.

Vstup horkých spalin do výměníku:

$$E_{v,1200} = V_{sp,celk} \cdot c_{sp} \cdot T_{sp} \quad [MJ \cdot kg^{-1}] \quad (5.42)$$

$$E_{v,1200} = 2406,56 \cdot 1,65 \cdot 1473 = 5849 \quad [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Výstup ochlazených spalin z výměníku:

$$E_{v,250} = V_{sp,celk} \cdot c_{sp} \cdot T_{sp} \quad [MJ \cdot kg^{-1}]$$

$$E_{v,250} = 2406,56 \cdot 1,36 \cdot 523 = 1712 \quad [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Využitelné teplo ve výměníku:

Účinnost výměníku uvažuji 75%, $\eta_v = 0,75$

$$P_v = \eta_v \cdot \Delta E_v \quad [MJ \cdot kg^{-1}]$$

$$P_v = 0,75 \cdot (5849 - 1712) = 3102,75 \quad [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Množství teplé vody o parametrech 70 / 90 [°C]:

$$m_v = \frac{P_v}{(C_v \cdot \Delta T)} \quad [m^3 \cdot h^{-1}]$$

$$m_v = \frac{3102,75}{4,19 \cdot 20} = 37 \quad [m^3 \cdot h^{-1}]$$

6 NÁVRH PRAČKY SPALIN

Nejvhodnější metodou čištění spalin je v tomto případě použití polosuché metody. Tato metoda se dá rozdělit na následující procesy – rozprašování vápenného sorbentu, vypařování sorbentu, reakce se spalinami a zachycení suchého produktu reakce na látkovém filtru. Rozprašováním sorbentu vzniká vnitřní kontakt mezi horkými spalinami a absorpčním povrchem, tím vznikají optimální podmínky pro snadný a rychlý přestup tepla i hmoty. Ve spalinách jsou obsaženy kyselé plyny jako SO_2 , SO_3 , HF a HCl, ty zreagují na drobné alkalické kapičky, které se následně v proudu spalin vysuší. Na látkovém filtru se potom zachytí vytvořený jemný sypký produkt. Při použití polosuché metody se dá výhodně využít recirkulace vápenného sorbentu.

Účinnost zachycení škodlivin při této metodě je až 90 %. Ta však závisí na vstupních hodnotách škodlivin. Dochází k odlučování sloučenin síry, chloru, fluoru a také oxidů těžkých kovů. Oproti mokré metodě čištění spalin je polosuchá metoda výhodná v relativní jednoduchosti a skutečnosti, že při tomto procesu nevznikají žádné odpadní vody.

Podmínky pro optimální absorpci těžkých kovů a škodlivin ve spalinách:

- Rovnoměrné rozdělení proudového pole spalin a dobrý kontakt spalin s aditivem
- Rozsáhlý reakční povrch s dosažením průměru kapiček v rozmezí 10-40 μm a jejich povrchem v rozmezí 150-500 $\text{m}^2 \cdot \text{l}^{-1}$
- Pro účinné pohlcení těžkých kovů je zapotřebí zvětšit aktivní plochy vytvořené vápnem o hygroskopický reakční povrch produktu vráceného cirkulací
- Dostatečná doba pro reakci v rozmezí 10-60 s
- Nejjemnější částičky v úletu mají relativně největší povrch, aby nedošlo k vazbě těžkých kovů, musí dojít k jejich odloučení

Pokud je v odpadu obsah chloru menší než 2,5 %, je podle Funkčních zkoušek [13] při polosuché metodě čištění spalin výhodnější použití dvoustupňové pračky spalin. Důvodem je dosažení co nejdelší reakční doby spalin se sorbentem. Pokud by měl odpad obsah chloru nad 2,5 %, bylo by nutné použít mokrou vypírku spalin.

6.1 Výpočet délky reakčních komor

6.1.1 Model kapky

Při vstupu vápenné emulze do pračky dochází k jejímu rozstříku na velké množství malých kapiček. Pohyb kapiček lze potom rozdělit na dvě fáze:

- ohřev kapky
- vypařování kapky

Vápenná emulze vstupuje do pračky o teplotě 20 °C, která je přibližně shodná s teplotou okolí pračky. V první části dochází k ohřátí na teplotu vypařování. Ta je pro jednoduchost brána jako teplota vypařování vody za normálního stavu. V prvním úseku je hmotnost kapky konstantní. Ve druhém úseku, kde dochází k odpařování kapky, je konstantní teplota.

6.1.2 Počáteční rychlost kapky

Rychlost kapky, která opouští trysku, závisí na parametrech stlačeného vzduchu a na množství dopravovaného sorbentu.

Pro vzduch a sorbent platí tyto vstupní hodnoty:

Tlak vzduchu na vstupu do trysky p_1	0,9	[MPa]
Tlak v reaktoru p_0	0,1	[MPa]
Množství vzduchu V_{vzd}	17	[m ³ · h ⁻¹]
Teplota sorbentu na vstupu do pračky t_s	20	[°C]
Množství sorbentu Q_s	40	[l · h ⁻¹]

Hustota vzduchu (při tlaku 0,9 MPa):

$$\rho_{vzd} = \frac{p_1}{r_{vzd} \cdot T_{vzd}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.1)$$

$$\rho_{vzd} = \frac{0,9}{287 \cdot 293} = 10,703 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

r_{vzd}měrná plynová konstanta vzduchu [kJ · kg⁻¹ · K⁻¹]

Rychlost vzduchu na výstupu z trysky:

$$v_{vzd} = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_0}{\rho_{vzd}}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6.2)$$

$$v_{vzd} = 0,35 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{0,9 - 0,1}{10,703}} = 135 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

μ průtokový součinitel, $\mu = 0,35$, Černý [14]

Rychlost proudění sorbentu vystupujícího z trysky:

$$v_s = \frac{4 \cdot Q_s}{\pi \cdot D_t^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6.3)$$

$$v_s = \frac{4 \cdot 1,11 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2} = 0,4 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

D_tprůměr trysky

$D_t = 6 \cdot 10^{-3}$ m, navrženo podle trysky stejného typu měřené ve Funkčních zkouškách [13].

Výstupní rychlost kapky:

Výstupní rychlost kapky je určena ze zákona zachování hybnosti:

$$v_{vzd} \cdot m_{vzd} + v_s \cdot m_s = (m_{vzd} + m_s) \cdot v_k \quad (6.4)$$

v_{vzd}rychlost vzduchu vystupujícího z trysky [m · s⁻¹]

v_srychlost sorbentu vystupujícího z trysky [m · s⁻¹]

m_{vzd}množství vzduchu [kg · s⁻¹]

m_smnožství sorbentu [kg · s⁻¹]

v_kvýsledná rychlost kapky [m · s⁻¹]

$$v_k = \frac{v_{vzd} \cdot m_{vzd} + v_s \cdot m_s}{m_{vzd} + m_s} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$v_k = \frac{135 \cdot 0,054 + 0,4 \cdot 0,0134}{0,054 + 0,0134} = 108,2 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

6.1.3 Hmotnost kapky

$$M_k = \frac{1}{6} \cdot \rho_k \cdot \pi \cdot D_k^3 \quad [\text{kg}] \quad (6.5)$$

$$M_k = \frac{1}{6} \cdot 1210 \cdot \pi \cdot (145 \cdot 10^{-6})^3 = 1,93 \cdot 10^{-9} \quad [\text{kg}]$$

$$D_k \dots \dots \text{maximální průměr kapky} \quad [\text{m}]$$

Maximální průměr kapky jsem stanovil na základě měření zpracovaných v Mádr [15].

$$\rho_k \dots \dots \text{hustota kapky (sorbertu)} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$\rho_k = 1210 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, hustota sorbertu je závislá na poměru směsi vody a hydroxidu vápenatého, za optimální se bere poměr 1 : 4 v Rabinovič [16].

6.1.4 Přenos tepla při ohřevu a vypařování kapky

Předávané teplo kapce, která opustí trysku, vysoce ovlivňuje velikost dráhy ohřevu a vypaření kapky. Jelikož jsou v jednotlivých sekcích rozdílné teploty, provede se výpočet na každý stupeň pračky zvlášť. Postup výpočtu čerpám z Rédr [7].

Výpočet pro první stupeň pračky

Výpočet součinitele přestupu tepla:

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda_{sp}}{D_k} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.6)$$

$$N_u = 2 + 0,552 \cdot \sqrt{R_e} \cdot (P_r)^{\frac{1}{3}} \quad [1] \quad (6.7)$$

$$R_e = \frac{v_k \cdot D_k}{\nu_{sp}} < 2100 \quad [1] \quad (6.8)$$

$$P_r = \frac{\nu_{sp}}{a_{sp}} \quad [1] \quad (6.9)$$

$$a_{sp} = \frac{\lambda_{sp}}{c_{sp} \cdot \rho_{sp}} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (6.10)$$

$$a_{sp} \dots \dots \dots \text{součinitel teplotní vodivosti spalín} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$c_{sp} \dots \dots \dots \text{měrná tepelná kapacita kapky} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\nu_{sp} \dots \dots \dots \text{kinematická viskozita spalín} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Hodnoty pro spaliny lehkého topného oleje při teplotě 210 °C jsou odečteny z Hašek [6].

$$\nu_{sp} = 33,59 \cdot 10^{-6} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\lambda_{sp} = 43,88 \cdot 10^{-3} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{sp} = 1,14 \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\rho_{sp} = 0,722 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$a_{sp} = \frac{\lambda_{sp}}{c_{sp} \cdot \rho_{sp}} = \frac{43,88 \cdot 10^{-3}}{1,14 \cdot 10^3 \cdot 0,722} = 5,33 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$P_r = \frac{\nu_{sp}}{a_{sp}} = \frac{33,59 \cdot 10^{-6}}{5,32 \cdot 10^{-5}} = 0,63 \quad [1]$$

$$R_e = \frac{\nu_k \cdot D_k}{\nu_{sp}} = \frac{108,2 \cdot 145 \cdot 10^{-6}}{33,59 \cdot 10^{-6}} = 467 \quad [1]$$

$$N_u = 2 + 0,552 \cdot \sqrt{R_e} \cdot (P_r)^{\frac{1}{3}} = 2 + 0,552 \cdot \sqrt{467} \cdot (0,63)^{\frac{1}{3}} = 12,73 \quad [1]$$

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda_{sp}}{D_k} = \frac{12,23 \cdot 43,88 \cdot 10^{-3}}{145 \cdot 10^{-6}} = 3701,05 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Přenos tepla při ohřevu kapky:

Dochází k ohřevu kapky z teploty 20 °C na teplotu 100 °C.

$$\alpha \cdot \pi \cdot D_k^2 \cdot (T_0 - T_w^*) = c_{p,k} \cdot M_k \cdot \frac{T_w' - T_w}{\Delta \tau} \quad (6.11)$$

$$T_0 \dots \dots \dots \text{teplota spalín na vstupu do pračky} \quad [K]$$

$$T_w^* \dots \dots \dots \text{teplota kapky v předchozím časovém kroku} \quad [K]$$

T'_wkonečná teplota kapky [K]

T_wpočáteční teplota kapky [K]

$\Delta\tau$časový krok [s]

$c_{p,k}$měrná tepelná kapacita kapky [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

Počítám s měrnou tepelnou kapacitou vody $c_{p,k} = 4180 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, Hašek [6].

Za teplotu T_w^* uvažuji střední hodnotu mezi teplotami 20 °C a 100 °C, $T_w^* = 60$ [°C].

Doba potřebná k ohřevu kapky z teploty 20 °C na teplotu 100 °C:

$$\tau_{1k} = \frac{c_{p,k} \cdot M_k \cdot (T'_w - T_w)}{\alpha \cdot \pi \cdot D_k^2 \cdot (T_0 - T_w^*)} \quad [s] \quad (6.12)$$

$$\tau_{1k} = \frac{4180 \cdot 1,93 \cdot 10^{-9} \cdot (373 - 293)}{3701,05 \cdot \pi \cdot (145 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (523 - 333)} = 0,0139 \quad [s]$$

Přenos tepla při vypařování kapky:

Aby byl výpočet jednodušší, uvažuji, že hmotnost a plocha kapky jsou během vypařování konstantní.

$$\frac{m_k \cdot l_v}{\Delta\tau} = \alpha \cdot S_k \cdot \Delta T \quad [^\circ C] \quad (6.13)$$

t_sstřední teplota spalin v prvním stupni

$$t_s = \frac{t_{sp} + t_{výst}}{2} \quad [^\circ C] \quad (6.14)$$

$$t_s = \frac{250 + 170}{2} = 210 \quad [^\circ C]$$

$$\Delta t = t_s - t_{vyp} \quad [^\circ C] \quad (6.15)$$

$$\Delta t = 210 - 100 = 110 \quad [^\circ C]$$

l_vměrné výparné teplo kapky, uvažuji měrné výparné teplo vody [$kJ \cdot kg^{-1}$]

$$l_v = 2257 \cdot 10^3, \text{ Hašek [6]} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

S_kplocha povrchu kapky (povrch koule) [m^2]

Doba vypaření kapky:

$$\tau_{2k} = \frac{M_k \cdot l_v}{\alpha \cdot S_k \cdot \Delta T} \quad [s] \quad (6.16)$$

$$\tau_{2k} = \frac{1,93 \cdot 10^{-9} \cdot 2257 \cdot 10^3}{3701,05 \cdot 6,605 \cdot 10^{-8} \cdot 110} = 0,162 \quad [s]$$

Celková doba ohřevu a vypaření kapky v prvním stupni pračky:

$$\tau_k = \tau_{1k} + \tau_{2k} \quad [s] \quad (6.17)$$

$$\tau_k = 0,0139 + 0,16199 = 0,176 \quad [s]$$

Výpočet přenosu tepla pro druhý stupeň pračky

Vstupní teplota do druhého stupně pračky je 170 °C, výstupní hodnota je 125 °C. Sřední hodnota, pro kterou jsem odečetl fyzikální vlastnosti spalín je 150 °C. [6]

$$v_{sp} = 26,28 \cdot 10^{-6} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\lambda_{sp} = 37,69 \cdot 10^{-3} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{sp} = 1,12 \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\rho_{sp} = 0,722 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$a_{sp} = \frac{\lambda_{sp}}{c_{sp} \cdot \rho_{sp}} = \frac{37,69 \cdot 10^{-3}}{1,12 \cdot 10^3 \cdot 0,847} = 3,97 \cdot 10^{-5} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$P_r = \frac{v_{sp}}{a_2} = \frac{26,28 \cdot 10^{-6}}{3,97 \cdot 10^{-5}} = 0,66 \quad [1]$$

$$R_e = \frac{v \cdot D_k}{v_{sp}} = \frac{108,2 \cdot 145 \cdot 10^{-6}}{26,28 \cdot 10^{-6}} = 597 \quad [1]$$

$$N_u = 2 + 0,552 \cdot \sqrt{R_e} \cdot (P_r)^{\frac{1}{3}} = 2 + 0,552 \cdot \sqrt{597} \cdot (0,66)^{\frac{1}{3}} = 13,74 \quad [1]$$

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda_{sp}}{D_k} = \frac{13,74 \cdot 37,69 \cdot 10^{-3}}{145 \cdot 10^{-6}} = 3571,45 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Přenos tepla při ohřevu kapky:

$$\tau_{1k} = \frac{c_{p,k} \cdot M_k \cdot (T'_w - T_w)}{\alpha \cdot \pi \cdot D_k^2 \cdot (T_0 - T_w^*)} = \frac{4180 \cdot 1,93 \cdot 10^{-9} \cdot (373 - 293)}{3701,05 \cdot \pi \cdot (145 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (443 - 333)} = 0,024 [s]$$

$$T_0 = 170 \quad [^{\circ}C]$$

$$\alpha = 3571,45 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Hodnoty ostatních veličin jsou stejné jako při výpočtu prvního stupně pračky.

Přenos tepla při vypařování kapky:

$$\tau_{2k} = \frac{M_k \cdot l_v}{\alpha \cdot S_k \cdot \Delta T} = \frac{1,93 \cdot 10^{-9} \cdot 2257 \cdot 10^3}{3701,05 \cdot 6,605 \cdot 10^{-8} \cdot 50} = 0,356 \quad [s]$$

$$t_s = \frac{170 + 125}{2} = 147,5 = 150 \quad [^{\circ}C]$$

$$\Delta t = t_s - t_{vyp} = 150 - 100 = 50 \quad [^{\circ}C]$$

$$\alpha = 3571,45 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Hodnoty ostatních veličin jsou stejné jako při výpočtu prvního stupně pračky.

Celková doba ohřevu a vypaření kapky v druhém stupni pračky:

$$\tau_k = \tau_{1k} + \tau_{2k} = 0,024 + 0,356 = 0,38 \quad [s]$$

6.1.5 Určení rychlosti pohybu kapky

Na kapku pohybující se v pračce působí tyto síly:

$$F_x, \dots \text{odporová síla} \quad [N]$$

$$F_x = \pi \cdot R_k^2 \cdot 0,5 \cdot \rho_{sp} \cdot v_k^2 \cdot C_x \quad [N] \quad (6.18)$$

$$F_g, \dots \text{gravitační síla} \quad [N]$$

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_k^3 \cdot \rho_k \cdot g \quad [N] \quad (6.19)$$

F_{vz}vztlaková síla [N]

$$F_{vz} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_k^3 \cdot \rho_{sp} \cdot g \quad [N] \quad (6.20)$$

Síly vztlakové a gravitační můžeme v dalších výpočtech zanedbat, jelikož mají v porovnání s ostatními veličinami velmi malé hodnoty.

R_kpoloměr kapky [m]

ρ_{sp}hustota spalín [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c_xsoučinitel odporu [1]

Součinitel odporu je funkcí Reynoldsova kritéria:

$$c_x = \frac{24}{Re} \quad Re < 0,1$$

$$c_x = \frac{18,5}{Re^5} \quad 2 < Re < 500$$

$$c_x = 0,44 \quad Re = 500 \text{ až } 2 \cdot 10^5$$

Základní pohybová rovnice je dána vztahem:

$$M_k \cdot a = F_g - F_x \quad (6.21)$$

Dosazením a úpravou dostaneme diferenciální rovnici:

$$\frac{dv}{dt} = -k_1 \cdot v_k^2 + k_2 \quad (6.22)$$

Řešením této rovnice je hledaná závislost $v_k = f(t)$

$$v_k = \frac{(c^2 + c \cdot v_0) \cdot e^{2 \cdot c \cdot k_1 \cdot t} + c \cdot v_0 - c^2}{(c + v_0) \cdot e^{2 \cdot c \cdot k_1 \cdot t} + c - v_0} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kde:

$$k_1 = \frac{\pi \cdot R_k^2 \cdot \rho_k \cdot c_x}{2 \cdot M_k} \quad [1] \quad (6.23)$$

$$k_1 = \frac{\pi \cdot (72,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,722 \cdot 0,44}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^{-9}} = 1,36$$

$$k_2 = \frac{\pi \cdot R_k^3 \cdot \rho_k \cdot g}{3 \cdot M_k} \quad [1] \quad (6.24)$$

$$k_2 = \frac{\pi \cdot (72,5 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1210 \cdot 9,81}{3 \cdot 1,93 \cdot 10^{-9}} = 2,45$$

$$c = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \quad [1] \quad (6.25)$$

$$c = \sqrt{\frac{2,45}{1,36}} = 1,8 \quad [1]$$

Rychlost kapky nemá lineární průběh, musím tedy rozdělit dráhu na dílčí úseky, ve kterých jsem stanovil střední hodnotu rychlosti a dráhu, kterou kapka v daném čase urazí. Přehledné výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce č. 6-1.

τ [s]	v_k [m·s ⁻¹]	v_{sk} [m·s ⁻¹]	S_k [m]	τ [s]	v_k [m·s ⁻¹]	v_{sk} [m·s ⁻¹]	S_k [m]
0	108,000	0,000	0,000	0,06	11,104	13,440	0,269
0,0025	79,002	93,501	0,234	0,08	8,597	9,851	0,197
0,005	62,283	70,643	0,177	0,1	7,040	7,819	0,156
0,0075	51,408	56,846	0,142	0,12	5,984	6,512	0,130
0,01	43,769	47,589	0,119	0,14	5,222	5,603	0,112
0,0125	38,109	40,939	0,102	0,16	4,650	4,936	0,099
0,015	33,747	35,928	0,090	0,176	4,287	4,469	0,072
0,0175	30,284	32,015	0,080	0,2	3,854	4,071	0,098
0,002	27,467	28,875	0,072	0,22	3,568	3,711	0,074
0,0225	25,131	26,299	0,066	0,24	3,333	3,451	0,069
0,025	23,163	24,147	0,060	0,26	3,137	3,235	0,065
0,0275	21,482	22,322	0,056	0,28	2,972	3,054	0,061
0,03	20,030	20,756	0,052	0,3	2,831	2,901	0,058
0,04	15,777	17,904	0,179	0,38	2,438	2,634	0,211

Tabulka 6-1: Pohyb kapky v pračce [vlastní tvorba]

Abych zjistil potřebnou délku pračky, musím sečíst dráhy v jednotlivých dílčích úsecích, tím získám výslednou dráhu pohybu kapky. Doba ohřátí a vypařování kapky u prvního stupně pračky je 0,176 s, během tohoto času urazí kapka dráhu 2,46 m. U druhého stupně je to 0,38 s a dráha 3,09. Délku obou stupňů pračky tedy navrhuji 3 m. Tato délka je dostatečná i pro druhý stupeň pračky. Během vypařování ve skutečnosti dochází ke snížení hmotnosti kapky a tím tedy ke zkrácení dráhy během jejího pohybu v pračce.

6.2 Určení průměru dvoustupňové pračky spalin

Minimální doba setrvání spalin v obou sekcích pro úplné odstranění SO₂, HCl a Cl je minimálně 11 sekund. Dle toho volím průměry reakčních komor.

Rychlost proudění spalin v pračce:

$$w_{sp,p} = \frac{s}{t_{sp}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6.26)$$

$$w_{sp,p} = \frac{3}{5,5} = 0,55 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$w_{sp,p}$rychlost pohybu spalin v pračce [m · s⁻¹]

sdélka reakční komory [m]

t_{sp}doba setrvání spalin v jednom stupni [s]

Průměr reakčních komor:

$$S_p = \frac{V_{sp}}{w_{sp,p}} \quad [m^2] \quad (6.27)$$

$$S_p = \frac{0,67}{0,55} = 1,22 \quad [m^2]$$

S_pplocha reaktoru [m²]

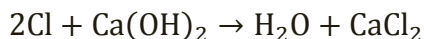
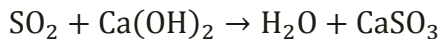
$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot S_p}{\pi}} \quad [m] \quad (6.28)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,22}{\pi}} = 1,25 \quad [m]$$

Volím $D_p = 1,3$ m. Při tomto průměru reakční komory je rychlost spalin 0,5 s a po přepočtech je celková doba setrvání spalin v obou sekcích tedy 12 s.

6.3 Výpočet potřebného množství sorbentu

Spalovaný odpad má maximální obsah síry (S) 2 % a chloru (Cl) 2,5 %. K odsíření spalín z odpadu určím potřebné množství sorbentu z následujících rovnic:



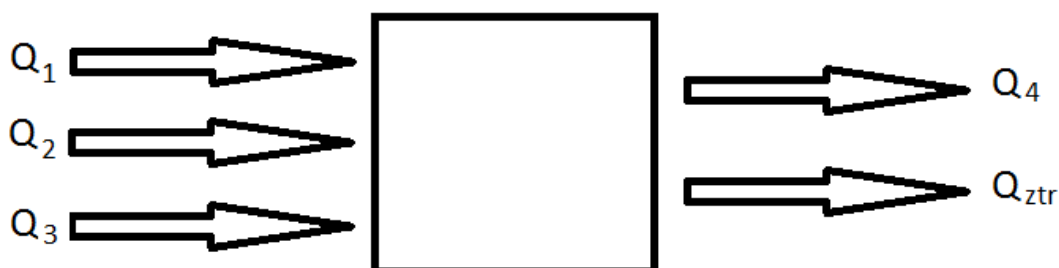
80 kg odpadu obsahuje 3,14 kg SO_2 a 2 kg Cl

Z rovnic jsem zjistil, že na 80 kg odpadu je potřeba 5,8 kg $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Nejvyšší účinnosti odsíření se může dosáhnout při dvojnásobném množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ než je stechiometrické. V tom případě na 80 kg odpadu připadne 11,6 kg $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sorbent vznikne smícháním vápna s vodou v poměru 1:4. Při hustotě sorbentu $1210 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ dostanu potřebné množství $48 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

6.4 Tryska sorbentu

V pračce se rozstřík vápenného mléka provádí dvěma tryskami, na každou z nich připadne $24 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Aby došlo k dokonalému rozprášení sorbentu a jeho promísení se spalínami, musí mít tryška splňovat požadované vlastnosti. Spotřeba vzduchu o tlaku 0,9 MPa pro rozprášení $48 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ sorbentu je $24 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$. [13]

6.5 Teplota spalín na výstupu z pračky



Obrázek 6-1: Energetická bilance pračky [vlastní tvorba]

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_{ztr}$$

$$Q_1 \dots\dots\dots \text{vstup spalín} \quad [\text{kW}]$$

$$Q_2 \dots\dots\dots \text{přívod vzduchu} \quad [\text{kW}]$$

$$Q_3 \dots\dots\dots \text{přívod sorbentu} \quad [\text{kW}]$$

$$Q_4 \dots\dots\dots \text{výstup spalín} \quad [\text{kW}]$$

$Q_{ztr} \dots\dots\dots$ ztráty, dle měření uvedených ve Funkčních zkouškách [13], činí ztráty pračky přibližně 10% z Q_1

$$Q_1 = V_{sp1} \cdot c_{sp1} \cdot t_1 \quad [\text{kW}] \quad (6.29)$$

$$Q_2 = V_{vzd} \cdot c_{vzd} \cdot t_{vzd} \quad [\text{kW}] \quad (6.30)$$

$$Q_3 = m_s \cdot c_p^v \cdot t_v - m_s \cdot c_p^v \cdot t'_v - m_s \cdot l_v - m_s \cdot c_p^p \cdot t''_v \quad [\text{kW}] \quad (6.31)$$

$$Q_4 = V_{sp2} \cdot c_{sp2} \cdot t_2 - V_{vzd} \cdot c_{vzd} \cdot t_2 + m_v \cdot c_p^p \cdot t_2 \quad [\text{kW}] \quad (6.32)$$

$$V_{sp1} \dots\dots\dots \text{množství spalín vstupujících do pračky} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$V_{sp2} \dots\dots\dots \text{množství spalín vystupujících z pračky} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$t_1 \dots\dots\dots \text{vstupní teplota spalín z pračky} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t_2 \dots\dots\dots \text{výstupní teplota spalín z pračky} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t_v \dots\dots\dots \text{vstupní teplota vody} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t'_v \dots\dots\dots \text{teplota varu vody} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t''_v \dots\dots\dots \text{teplota syté vodní páry} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$c_{sp} \dots\dots\dots \text{měrná tepelná kapacita spalín} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_N^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_p^v \dots\dots\dots \text{měrná tepelná kapacita vody} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_p^p \dots\dots\dots \text{měrná tepelná kapacita vodní páry} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$l'_v \dots\dots\dots \text{měrné výparné teplo vodní páry} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Po dosazení do bilanční rovnice, vyjádřím teplotu spalin na výstupu z pračky:

$$t_2 = \frac{0,9 \cdot V_{sp1} \cdot c_{sp1} \cdot t_1 - m_s \cdot [c_p^v \cdot (t'_v - t_v) + l_v + c_{p1}^p \cdot t''_v]}{V_{sp2} \cdot c_{sp2} + m_s \cdot c_{p2}^p} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.33)$$

6.5.1 Výstupní teplota spalin z prvního stupně pračky

$$V_{sp2} = V_{sp1} + V_{vzd} + V_{H_2O} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.34)$$

$$V_{vzd} \dots \dots \dots \text{množství vzduchu přiváděného do trysky} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$V_{H_2O} \dots \dots \dots \text{množství vodní páry vzniklé odpařením sorbentu} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \cdot m_s = \frac{22,4}{18} \cdot 24 = 29,87 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (6.35)$$

$$V_{H_2O} = 0,0083 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$V_{sp2} = 0,67 + 0,0033 + 0,0083 = 0,682 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$t_{2I} = \frac{0,9 \cdot 0,67 \cdot 1,41 \cdot 205 - 0,0066 \cdot [4,18 \cdot (100 - 20) + 2257 - 2,05 \cdot 100]}{0,682 \cdot 1,39 + 0,066 \cdot 1,98} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{2I} = 205 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

6.5.2 Výstupní teplota spalin z druhého stupně pračky

$$t_{2II} = \frac{0,9 \cdot 0,682 \cdot 1,38 \cdot 205 - 0,0066 \cdot [4,18 \cdot (100 - 20) + 2257 - 2,05 \cdot 100]}{0,694 \cdot 1,38 + 0,066 \cdot 1,98} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{2II} = 163 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Při výstupu spalin z pračky je důležité, aby výstupní teplota spalin nebyla menší, než je hodnota rosného bodu. Důvodem je, že vzniklý kondenzát při těchto teplotách obsahuje agresivní kyseliny jako H_2CO_3 , H_2SO_3 a H_2SO_4 , které napadají ocelové části zařízení. Největší vliv na teplotu rosného bodu má přebytek vzduchu ve spalinách a obsah síry v palivu. V konkrétním případě, kdy spalování odpadu s obsahem síry do 2 % probíhá při

přebytku vzduchu až $n_{\max} = 2$, se hodnota rosného bodu podle poznatků z Funkčních zkoušek [13] pohybuje do 80 °C.

Pokud dojde k poklesu teploty spalin pod minimální mez, kterou stavuji 100 °C, zapne se přídavný hořák umístěný za druhým stupněm pračky. Použitý hořák je limitován maximální přípustnou teplotou spalin proudící do látkového filtru, která je 200 °C.

6.6 Příprava sorbentu

Příprava sorbentu je celek, který zahrnuje dávkování, míchání a dopravu sorbentu do rozprašovacích trysek. Tento systém je opatřen dvojicí dávkovacích čerpadel, míchací a plnicí stanicí. Míchání $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s vodou se provádí v poměru 1:4 s tím, že spotřeba hydroxidu vápenatého je 11 kg za hodinu a hodinová spotřeba vody je 48 l.

6.7 Návrh kompresoru a čerpadla

Stlačený vzduch pro přívod sorbentu do pračky spalin o tlaku 0,9 MPa a množství vzduchu $24 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (max. $48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Bude zajišťovat kompresorová stanice FLEX S 6. Jedná se o šroubový kompresor s moderní technologií přímého přenosu hnací síly motoru na šroubový blok. Kompresorová stanice obsahuje šroubové soustrojí, asynchronní elektromotor s účinností 90-96 %, vstupní filtr a účinný dochlazovač oleje a vzduchu se snadným přístupem pro čištění. Hmotnost kompresoru je 136 kg a příkon elektromotoru 5,5 kW. [17]

Do trysek je dopravován sorbent pomocí plunžrových čerpadel. Navrhuji čerpadlo výrobce Sigmet spol. s.r.o., na jednu trysku je napojeno jedno čerpadlo. Regulace čerpadel je v rozmezí $0 - 100 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. [18]

7 NÁVRH FILTRU SPALIN

Určení velikosti filtrační plochy:

$$V_{sp F} = V_{sp} \cdot \frac{T_F}{T_N} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (7.1)$$

$$V_{sp F} = 0,694 \cdot \frac{434}{273} = 1,1 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$S_F = \frac{V_{spF}}{V_F} \quad [m^2] \quad (7.2)$$

$$S_F = \frac{1,1}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 73,5 \quad [m^2]$$

$$S_F \dots \dots \dots \text{filtrační plocha} \quad [m^2]$$

$$v_F \dots \dots \dots \text{filtrační rychlost} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Navrhuji látkový filtr s činnou plochou 85 m². Látkový filtr je určen k odlučování pevných částic při teplotách spalin do 180 °C. Filtrační rychlost v rozmezí 1,5-2,5 cm · s⁻¹. Ta se volí podle velikosti a lepivosti odlučovaných pevných částic. Abychom prodloužili životnost tkaniny filtru, je vhodné volit filtrační rychlost na spodní hranici rozmezí. Tlaková ztráta u látkového filtru dosahuje hodnot 400 až 1500 Pa. U spaloven odpadů se pohybuje životnost filtrační tkaniny při výstupní koncentraci tuhých částic 3 mg · m⁻³ 3000 hod.

Čištěné spaliny jsou vedeny do výsypky filtru vstupním potrubím. Ve výsypce dochází k rozdělení spalin do dvou filtračních komor. V nich proudí přes filtrační tkaninu, na kterou se zachycují pevné částice. Vyčištěné spaliny dále proudí přes vnitřní stranu kapes do víka filtru, přes antivibrační vložky, regenerační panely a regenerační ventily až do výstupního potrubí.

8 AERODYNAMICKÉ VÝPOČTY

Určení tlakové ztráty je důležité pro navržení spalínového ventilátoru, ten musí zajistit podtlak v celém systému spalovny. Pod tlakem se zamezí úniku škodlivin do okolí.

Tlaková ztráta třením:

$$\Delta p_{ztr} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_{sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} \quad [\text{Pa}] \quad (7.3)$$

λsoučinitel tření [1]

ldélka potrubí [m]

dprůměr potrubí [m]

w_{sp}rychlost proudění spalin [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ_{sp}hustota spalin [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Součinitel λ určíme z Blasiova vztahu pro hladká potrubí a hodnoty $\text{Re} < 10^5$, Černý [14].

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad [1] \quad (7.4)$$

$$\text{Re} = \frac{w_{sp} \cdot a}{\nu_{sp}} \quad [1] \quad (7.5)$$

acharakteristický rozměr [m]

ν_{sp}kinematická viskozita spalin [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Tlaková ztráta místními odpory:

$$\Delta p_{zm} = \xi \cdot \frac{w_{sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} \quad [\text{Pa}] \quad (7.6)$$

ξsoučinitel ztrát místními odpory [1]

Celková tlaková ztráta je pak součtem třecích a místních ztrát.

8.1 Tlaková ztráta před pračkou spalin

Hodnotu tlakové ztráty spalovací komory, dohořivací komory a výměníku tepla uvádím jako teoretickou dle Funkční zkoušky [13]. Teoretická tlaková ztráta před pračkou spalin: $\Delta p_{pp} = 600$ [Pa]

8.2 Tlaková ztráta pračky spalin

Hodnoty fyzikálních vlastností spalin odečítám z Hašek [6] a součinitele místních ztrát z Recknagel [19].

8.2.1 První stupeň pračky

$$V_{sp1} = V_{sp} \cdot \frac{T}{T_N} \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$V_{sp1} = 0,67 \cdot \frac{483}{273} = 1,18 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$\rho_{sp} = 0,722 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$v_{sp} = 33,59 \cdot 10^{-6} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Koleno s usměrňovacími lopatkami:

$$d_1 = 0,4 \text{ m}, \quad \xi_1 = 1,2$$

$$w_{sp1} = \frac{V_{sp1}}{S_1} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{sp1} = \frac{1,18}{0,126} = 9,36 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm1} = \xi_1 \cdot \frac{w_{sp1}^2}{2} \cdot \rho_{sp} \quad [Pa]$$

$$\Delta p_{zm1} = 1,2 \cdot \frac{9,36}{2} \cdot 0,722 = 37,95 \quad [Pa]$$

Difuzor z průměru 0,4 m na 1,5 m, $\alpha = 30^\circ$:

$$w_{sp, stř1} = \frac{w_{sp1} + w_{sp2}}{2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (7.7)$$

$$w_{sp, stř1} = \frac{9,36 + 0,67}{2} = 5 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm2} = \xi_2 \cdot \frac{w_{sp, stř1}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,8 \cdot \frac{5^2}{2} \cdot 0,722 = 7,26 \quad [Pa]$$

Přímé potrubí:

$$d_2 = 1,5 [m], \quad l_2 = 2,34 [m]$$

$$w_{sp2} = \frac{V_{sp1}}{S_2} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$w_{sp2} = \frac{1,18}{1,767} = 0,67 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$Re = \frac{w_{sp2} \cdot a}{\nu_{sp}} \quad [1]$$

$$Re = \frac{0,67 \cdot 1,5}{33,59 \cdot 10^{-6}} = 29919 \quad [1]$$

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{29919^{0,25}} = 0,024 \quad [1]$$

$$\Delta p_{ztr1} = \lambda_1 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{w_{sp2}^2}{2} \cdot \rho_{sp} \quad [Pa] \quad (7.8)$$

$$\Delta p_{ztr1} = 0,024 \cdot \frac{2,34}{1,5} \cdot \frac{0,67^2}{2} \cdot 0,685 = 0,006$$

Přestup spalin z prvního do druhého stupně pračky:

Změna směru proudu o 180°

$$\xi_3 = 2,54$$

$$w_{sp3} = \frac{V_{sp1}}{S_3} = \frac{1,18}{0,385} = 3,06 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm3} = \xi_3 \cdot \frac{w_{sp3}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 2,54 \cdot \frac{3,06^2}{2} \cdot 0,685 = 8,17 \quad [\text{Pa}]$$

8.2.2 Druhý stupeň pračky

$$V_{sp2} = V_{sp} \cdot \frac{T}{T_N} = 0,682 \cdot \frac{423}{273} = 1,06 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\rho_{sp} = 0,847 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$v_{sp} = 26,28 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Přímé potrubí:

$$d_4 = 1,5 \text{ [m]}, \quad l_4 = 2,34 \text{ [m]}$$

$$w_{sp4} = \frac{V_{sp2}}{S_4} = \frac{1,06}{1,767} = 0,59 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{Re} = \frac{w_{sp4} \cdot a}{v_{sp}} = \frac{0,59 \cdot 1,5}{26,28 \cdot 10^{-6}} = 34240 \quad [1]$$

$$\lambda_2 = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{34240^{0,25}} = 0,023 \quad [1]$$

$$\Delta p_{ztr2} = \lambda_2 \cdot \frac{l_4}{d_4} \cdot \frac{w_{sp4}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,023 \cdot \frac{2,34}{1,5} \cdot \frac{0,59^2}{2} \cdot 0,847 = 0,005 \quad [\text{Pa}]$$

Konfuzor z průměru 1,5 m na 0,4 m, $\alpha = 30^\circ$:

$$w_{sp, stř2} = \frac{w_{sp4} + w_{sp5}}{2} = \frac{0,59 + 8,41}{2} = 4,5 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm4} = \xi_4 \cdot \frac{w_{sp, stř2}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,1 \cdot \frac{4,5^2}{2} \cdot 0,847 = 0,86 \quad [\text{Pa}]$$

Koleno s usměrňovacími lopatkami, výstup z pračky:

$$d_5 = 0,4 \text{ [m]}, \quad \xi_5 = 1,2 \text{ [-]}$$

$$w_{sp5} = \frac{V_{sp2}}{S_5} = \frac{1,06}{0,126} = 8,41 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm5} = \xi_5 \cdot \frac{w_{sp5}^2}{2} \cdot \rho = 1,2 \cdot \frac{8,41^2}{2} \cdot 0,847 = 35,94 \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta v pračce:

$$\Delta p_{zcP} = \Sigma \Delta p_{zrt} + \Sigma \Delta p_{zm} \quad [\text{Pa}] \quad (7.9)$$

$$\Delta p_{zcP} = 0,006 + 0,005 + 37,95 + 7,26 + 8,17 + 0,86 + 35,94 = 90,2 \quad [\text{Pa}]$$

8.3 Spojovací potrubí mezi pračkou spalín a filtrem

$$t_{sp} = 125 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{sp} = 0,722 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$v_{sp} = 33,59 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Koleno 90 [°], 2x:

$$d = 0,4 \text{ [m]}, \quad \xi = 1 [-]$$

$$V_{sp3} = V_{sp} \cdot \frac{T}{T_N} = 0,694 \cdot \frac{398}{273} = 1,012$$

$$w_{sp6} = \frac{V_{sp3}}{S_6} = \frac{1,012}{0,125} = 8,1 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm1+2} = 2 \cdot \xi \cdot \frac{w_{sp6}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 2 \cdot 1 \cdot \frac{8,1^2}{2} \cdot 0,722 = 47,37 \quad [\text{Pa}]$$

Přímé potrubí:

$$d_6 = 0,4 \text{ [m]}, \quad l_6 = 5,19 \text{ [m]}$$

$$\text{Re} = \frac{w_{sp6} \cdot d}{v_{sp}} = \frac{8,1 \cdot 0,4}{23,64 \cdot 10^{-6}} = 137055 \quad [1]$$

$$\lambda_3 = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{137055^{0,25}} = 0,016 \quad [1]$$

$$\Delta p_{ztr3} = \lambda_3 \cdot \frac{l_6}{d_6} \cdot \frac{w_{sp6}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,016 \cdot \frac{5,19}{0,4} \cdot \frac{8,1^2}{2} \cdot 0,722 = 4,92 \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta ve spojovacím potrubí:

$$\Delta p_{zCS} = \Sigma \Delta p_{ztr} + \Sigma \Delta p_{zm} = 47,37 + 4,92 = 52,29 \quad [\text{Pa}]$$

8.4 Tlaková ztráta filtru spalin

Volím maximální teoretickou ztrátu $\Delta p_{zF} = 1500 \text{ Pa}$.

Potrubí z filtru do spalinového ventilátoru

Koleno 90°:

$$d = 0,355 \text{ [m]}, \quad \xi = 1[-]$$

$$w_{sp7} = \frac{V_{sp3}}{S_7} = \frac{1,012}{0,099} = 10,22 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\Delta p_{zm1+2} = 2 \cdot \xi \cdot \frac{w_{sp7}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 2 \cdot 1 \cdot \frac{10,22^2}{2} \cdot 0,722 = 75,4 \quad [\text{Pa}]$$

Přímé potrubí:

$$d = 0,355 \text{ [m]}, \quad l = 2,91 \text{ [m]}$$

$$\text{Re} = \frac{w_{sp7} \cdot a}{\nu_{sp}} = \frac{10,22 \cdot 0,355}{23,64 \cdot 10^{-6}} = 153473 \quad [1]$$

$$\lambda_4 = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{153473^{0,25}} = 0,016 \quad [1]$$

$$\Delta p_{ztr4} = \lambda_4 \cdot \frac{l_7}{d_7} \cdot \frac{w_{sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,016 \cdot \frac{2,91}{0,355} \cdot \frac{10,22^2}{2} \cdot 0,722 = 4,95 \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta ve spojovacím potrubí:

$$\Delta p_{zCSV} = \Sigma \Delta p_{ztr} + \Sigma \Delta p_{zm} = 75,4 + 4,95 = 80,35 \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta:

$$\Delta p = \Delta p_{pp} + \Delta p_{zCP} + \Delta p_{zCS} + \Delta p_{zCSV} + \Delta p_{zF} \quad [\text{Pa}] \quad (7.10)$$

$$\Delta p = 600 + 90,2 + 52,29 + 80,35 + 1500 = 2323 \quad [\text{Pa}]$$

8.5 Návrh spalínového ventilátoru

Pro vytvoření podtlaku ve spalínovém systému navrhuji ventilátor typu RVI 400-1N-P18° PP 12 3340.2 od výrobce KLIMA a.s. Jde o vysokotlaký radiální ventilátor pro dopravu vzdušiny o teplotách v rozmezí -20 až 250 °C. Otáčky ventilátoru jsou 2900 min^{-1} a hmotnost ventilátoru je 90 kg. [20]

8.6 Komín

Komín se skládá ze tří dílů o celkové výšce 20 m a vnitřním průměrem 0,2 m. Průchod komínem je vyroben z materiálu, který je odolný proti působení škodlivého vlivu spalín. Další vrstvou je tepelná izolace a vnější část komínu je tvořena ocelovým pláštěm. Komín je zakotven do betonového bloku.

9 REGULACE

Spalovací komora

Provoz hořáku probíhá ve dvou režimech. V prvním režimu probíhá vyhřívání spalovací komory na 700 °C, v této fázi bude spalováno stabilizační palivo (LTO). Po dosažení této teploty dojde k automatickému spuštění ventilátoru spalovacího vzduchu a přejde se na spalování odpadu. Regulace ventilátoru spalovacího vzduchu je závislá na obsahu kyslíku ve spalinách, tak aby se množství kyslíku pohybovalo mezi hodnotami 8-16 %. Ve spalovací komoře je maximální teplota nastavena na 1100 °C. Pokud dojde k překročení této teploty, hořák se vypne a po poklesu teploty se funkce hořáku opět automaticky obnoví.

Dohořivací komora

V dohořivací komoře je maximální dosažitelná teplota 1400 °C. Pokud dojde k překročení této teploty, vypnou se oba hořáky. Havarijní klapka se udržuje v uzavřené poloze díky stlačeného vzduchu. V situaci, kdy dojde k výpadku elektrického proudu, dojde ke ztrátě tlaku na pneumatickém válci, který drží klapku a ta se samovolně otevře.

Výměník tepla

Regulace výměníku tepla slouží k udržení výstupní teploty spalin z výměníku (250 °C) a výstupní teploty chladící vody (90 °C). Regulace změnou hmotnostního průtoku vody.

Ekoblok

Regulace dávkování sorbentu je závislá na množství spalin před ekoblokem. Teplota spalin na výstupu z pračky spalin je také sledována a ta nesmí poklesnout pod teplotu rosného bodu spalin a zároveň překročit maximální teplotu pro vstup do látkového filtru. Poklesne-li teplota pod kritickou mez, dojde k automatickému zapnutí pomocného hořáku.

10 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem provedl projekční návrh spalovny nebezpečných kapalných odpadů o zadaném výkonu $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Navržené spalovací zařízení slouží ke spalování kapalných odpadů o velké výhřevnosti, v mém případě se jedná o odpad s obsahem látek na bázi PCB.

Ke spalování kapalného odpadu dochází ve válcové spalovací komoře, ta je opatřena žáruvzdornou a izolační vyzdívkou. V čelní stěně komory je uložen hořák na spalování kapalných odpadů. Primární spalovací vzduch je přiváděn za pomoci ventilátoru s automatickou regulací množství. Vzduch je přiváděn do spalovací komory soustavou trysek umístěných po obvodu hořákové tvarovky. Primární vzduch je předehříván při průchodu vnějším pláštěm spalovací komory.

Ze spalovací komory proudí spaliny do válcové dohořivací komory, která je taktéž opatřena žáruvzdornou a izolační vyzdívkou. Dohořivací komora je vybavena dopalovacím hořákem. V komoře dojde k termické a oxidační destrukci škodlivých látek. Teplota v komoře se pohybuje v rozmezí od $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, setrvání spalin při této teplotě je 2,7 sekund. Za dohořivací komorou je umístěna havarijní klapka, která slouží k odvodu tepla a spalin ze spalovacího zařízení a to v případě výpadku elektrického proudu.

Teplo, které získáme ze spalování odpadu a stabilizačního paliva je využito ve výměníku spaliny-voda. Při průchodu spalin výměníkem dojde k jejich ochlazení na optimální teplotu pro provoz pračky spalin.

Čištění spalin je zajištěno polosuchou metodou ve dvoustupňové pračce. Čištění probíhá vstřikováním vápenného sorbentu, který na sebe váže sloučeniny síry, chloru, fluoru a oxidy těžkých kovů. V pračce dojde k reakci, její produkt se zachytává na látkovém filtru nebo padá přímo do popelnice umístěné pod pračkou spalin. Sorbent vznikne smícháním $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s vodou v poměru 1:4.

Cílem regulace je v první řadě zabezpečit optimalizaci procesu spalování, tedy dosáhnout určitých teplot a zdržení spalin při předepsaných teplotách pro termickou likvidaci zadaného druhu odpadu. Pro účinný chod zařízení spalovny je zapotřebí sledování a regulace vstupních a výstupních teplota spalin v jednotlivých částech spalovny, hmotnostního průtoku vody ve výměníku a udržování podtlaku.

Technické parametry navržené spalovny:

Druh odpadu	-	Kapalný s PCB
Jmenovitý výkon	$[\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$	80
Výhřevnost odpadu	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	40
Obsah vody v odpadu	$[\%]$	2
Celkový tepelný výkon	$[\text{MW}]$	1,4
Celkový přebytek vzduchu	$[1]$	2
Objem spalovací komory (SK)	$[\text{m}^3]$	2,35
Množství spalin v SK	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	0,48
Zdržení spalin v SK	$[\text{s}]$	1,05
Max. teplota v SK	$[\text{°C}]$	1100
Palivo dohořívací komory (DK)	-	LTO
Výhřevnost LTO	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	40
Objem DK	$[\text{m}^3]$	9,72
Celkové množství spalin v DK	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	0,67
Zdržení spalin v DK	$[\text{s}]$	2,7
Minimální teplota spalin v DK	$[\text{°C}]$	1200
Výkon dopalovacího hořáku	$[\text{kW}]$	545
Výkon výměníku spaliny-voda	$[\text{kW}]$	867
Vstupní teplota spalin do pračky	$[\text{°C}]$	250
Výstupní teplota spalin z pračky	$[\text{°C}]$	125
Setrvání spalin v pračce	$[\text{s}]$	12

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AION CS. *Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění. Zákony pro lidi* [online]. 2010-2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/>.
- [2] AION CS. *Předpis č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Zákony pro lidi* [online]. 2001 [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>.
- [3] IRZ - INTEGROVANÝ REGISTR ZNEČIŠŤOVÁNÍ. *Polychlorované bifenylly (PCB)* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/polychlorovane_bifenyly.pdf.
- [4] OBROUČKA, Karel. *Termické zneškodňování odpadů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997, 140 s. ISBN 80-7078-505-5.
- [5] CVB VENTILÁTORY A KLIMATIZACE. *Vorticent C E range* [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.ventilatory-shop.cz/images/stories/virtuemart/product/ctl_vorticent_c_e97.pdf.
- [6] HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1980, 247 s.
- [7] RÉDR, Miroslav. *Základy tepelné techniky: celost. vysokošk. učebnice pro hutnické fakulty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991, 677 s. ISBN 80-03-00366-0.
- [8] ECO SERVICE. *Přetlakové hořáky LTO MAIOR* [online]. 2009 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.ecoservice.cz/horaky/pretlakove-horaky/pretlakove-horaky-lto/horaky-lto-maior/>.
- [9] PBS POWER EQUIPMENT. *Olejové hořáky AOH – M* [online]. 2008-2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.pbspe.cz/cze/index.php?action=catalogue_detail&id=28.
- [10] KERA VIT – *Žárovzdorné materiály, Žárovzdorné tvarovky, Žárovzdorné materiály pro slévárny*. 2009. [cit. 2015-05-07]. (prospekt)
- [11] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009, 100 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6.
- [12] TOMAN, Zdeněk; BÁLEK, Stanislav; KLEČKOVÁ, Zuzana. *Tepelně technické výpočty*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1983, 266 s.
- [13] *Funkční zkoušky prototypového zařízení pro výstavbu provozně neověřené spalovny pro jadernou elektrárnu typu VVER*, Výzkumná zpráva Katedry energetiky FS, VŠB Ostrava 1992

- [14] ČERNÝ, Václav; JANEBA, Břetislav; TEYSSLER, Jiří. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 858 s., 2 příl. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).
- [15] MÁDR, Vilém. *Rozpad kapalinových paprsků: maximální průměr kapek modelové kapaliny*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě. Řada hornicko-geologická b. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, [1971-1974], Roč. 18, č. 2, s. 175-191 : il. (1972).
- [16] RABINOVICH, Viniamin Abramovič; CHAVIN, Zacharij Jakovlevič. *Stručná chemická příručka*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985, 476 s.
- [17] JANUŠKA KOMPRESORY. *Šroubové kompresy FLEX* [online]. 2008 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.kompres.cz/kategorie/flex.aspx>.
- [18] SIGMET . *Vysokotlaká plunžrová čerpadla NP* [online]. 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.sigmet.cz/sortiment/prumyslova-cerpadla/cerpadla-hydrostaticka/plunzrova>.
- [19] RECKNAGEL, Hermann; SPRENGER, Eberhard. *Vykurovanie, vetranie, klimatizácia*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1971, 1131 s.
- [20] KLIMA. *Ventilátory radiální. RVI 315 až 630 jednostranně sací* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.klimacz.cz/images/Katalogy/kp_123340.pdf.
- [21] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. 3. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001, 266 s.
- [22] ŠESTÁK, Jiří; RIEGER, František *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 299 s. ISBN 80-01-02933-6.
- [23] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978, 414 s.
- [24] KUTZENDÖRFER, Jaroslav, MÁŠA, Zdeněk. *Žárovzdorné tepelně izolační materiály*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1991, 268 s. ISBN 80-85427-02-8.
- [25] LIBICH, Vladimír. *Parní kotle*. 1. Vyd. Brno: VUT – Vysoké učení technické v Brně, 1987, 197 s.
- [26] BLAHOŽ, Vladimír; KADLEC, Zdeněk. *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000, 109 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 80-902001-1-7.
- [27] BÁLEK, Stanislav. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2005, 129 s. ISBN 80-248-0828-5.
- [28] SPIELMANN, Michal a Jiří ŠPAČEK. *AutoCAD: názorný průvodce pro verze 2012 a 2013*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2013, 512 s. ISBN 978-80-251-3775-8.

- [29] BECK-ONLINE. *Seznam nebezpečných odpadů podléhajících zpřísněnému režimu* [online]. 1997 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.beck-online.cz/bo/attachments/Priloha_Sb_1997_337-5.pdf.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1: Obecná struktura PCB [3].....	16
Obrázek 5-1: Charakteristika hořáku MAIOR P60 [8].....	31
Obrázek 5-2: Charakteristika hořáku AOH-M 25PL [9].....	33
Obrázek 5-3: Schematické znázornění stěny spalovací komory [vlastní tvorba].....	37
Obrázek 5-4: Schematické znázornění stěny dohořivací komory [vlastní tvorba].....	42
Obrázek 6-1: Energetická bilance pračky [vlastní tvorba].....	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 6-1: Pohyb kapky v pračce [vlastní tvorba].....	57
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Přehled věcí, které se považují za odpady [2]

Příloha B - Seznam nebezpečných vlastností odpadu [2]

Příloha C - Seznam nebezpečných odpadů podléhajících zprísněnému režimu [29]

Příloha D - Technické parametry hořáku MAIOR P60 [8]

Příloha E - Základní technické parametry hořáku AOH-M 25 PL [9]

Příloha F - Rozměrové parametry hořáku AOH-M 25 P [9]

Příloha G - Vysoce hlinité tvarovky na bázi andalusitu [10]

Příloha H - Tepelně izolační tvarovky [10]

SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

Spalovací a dohořívací komora

MP-001-2015

Příloha A - Přehled věcí, které se považují za odpady

- odpad z výroby nebo spotřeby dále blíže nespecifikovaný,
- výrobky, které neodpovídají požadované jakosti,
- výrobky s prošlou lhůtou spotřeby,
- materiály rozlité, ztracené nebo jinou nehodou znehodnocené, včetně materiálů, zařízení apod., jež byly v důsledku nehody znečištěny,
- materiály znečištěné nebo znehodnocené v důsledku plánovaných činností (např. odpad po čistících operacích, obalové materiály, kontejnery),
- nepoužité součástky (např. vyřazené baterie, vyčerpané katalyzátory),
- látky, které ztratily požadované vlastnosti (např. znečištěné kyseliny, znečištěná rozpouštědla, vyčerpané temperovací soli),
- odpad z průmyslových procesů (např. strusky, destilační zbytky),
- odpad z procesů snižujících znečištění (např. kaly ze skrubrů, prach z vysavačů, upotřebené filtry),
- odpad z obrábění a tváření (např. třísky od soustružení, okuje z válcování),
- odpad z těžby s výjimkou odpadu podle (§ 1 odst. 2 písm. b) zákona, a zpracování surovin (např. důlní odpad, kaly z těžby ropy),
- znehodnocené materiály (např. oleje znečištěné polychlorovanými bifenoly),
- jakékoli materiály, látky nebo výrobky, jejichž používání bylo zákonem zakázáno,
- výrobky, pro které již vlastník nemá upotřebení (např. vyřazené předměty ze zemědělství, domácnosti, kanceláří, obchodů).

Příloha B - Seznam nebezpečných vlastností odpadu

- výbušnost,
- hořlavost,
- oxidační schopnost,
- tepelná nestálost organických peroxidů,
- schopnost odpadů uvolňovat při styku se vzduchem nebo vodou jedovaté plyny,
- ekotoxická,
- následná nebezpečnost,
- akutní toxicita,
- pozdní účinek,
- žíravost,
- infekčnost,
- radioaktivita

Příloha C - Seznam nebezpečných odpadů podléhajících zprůsňnému režimu

Kód	Název druhu odpadu
06 03 11	Soli a roztoky s obsahem kyanidů
06 04 03	Odpady s obsahem arzenu
06 04 04	Odpady s obsahem rtuti
11 01 01	Kyanidové odpady s obsahem těžkých kovů kromě chromu
11 01 02	Kyanidové (alkalické) odpady bez obsahu těžkých kovů
11 03 01	Odpady s obsahem kyanidů
13 01 01	Hydraulické oleje s obsahem PCB a PCT
13 03 01	Izolační a teplotnosné oleje a jiné kapaliny s obsahem PCB
14 01 01	Chlorfluoruhlovodíky
14 03 01	Chlorfluoruhlovodíky
14 04 01	Chlorfluoruhlovodíky
14 05 01	Chlorfluoruhlovodíky
16 02 01	Transformátory a kondenzátory s obsahem PCB nebo PCT
16 02 03	Zařízení s obsahem chlorfluoruhlovodíků

Příloha D - Technické parametry hořáku MAIOR P60

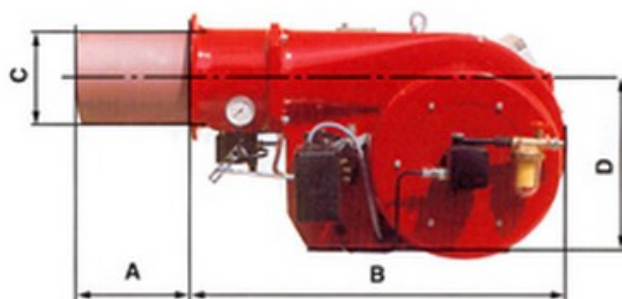
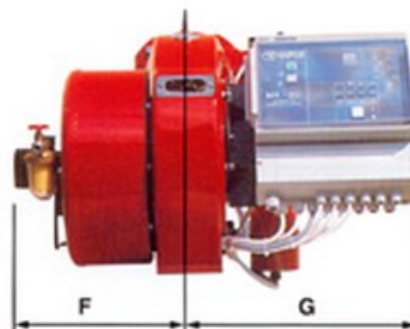
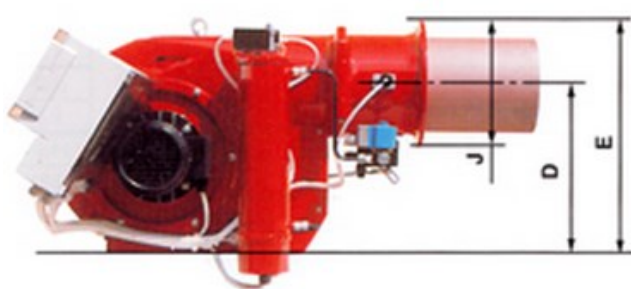
Max. výkon	[kW]	710
	[kcal/hx1000]	600
Min. výkon	[kW]	415
	[kcal/hx1000]	350
Max. spotřeba	[kg/h]	60
Min. spotřeba	[kg/h]	35
El. přepojení	[V]	230/400
Motor	[W]	0,74
Provoz		AB-PR-MD

Příloha E - Základní technické parametry hořáku AOH-M 25 PL

Tepelný výkon [kW]	Max. do nulového přetlaku	2400
	Max. do max. přetlaku	1570
	Min.	545
Max. přetlak ve spalovacím prostoru [Pa]		1280
Spotřeba paliva [kg·h⁻¹]	Při max. tepelném výkonu do nul. přetlaku	204,3
	Při max. tepelném výkonu do max. přetlaku	133,6
	Min.	46,4
Max. vstupní přetlak paliva [kPa]		100
Vstupní viskozita paliva [mm²·s⁻¹]		olej 4,3-50
		LTO 1,3-20
Hmotnost [kg]		120
El. příkon [kVA]		5,6

Příloha F - Rozměrové parametry hořáku AOH-M 25 P

Rozměr [mm]	A	300
	B	954
	C	Ø 286
	D	511
	E	711
	F	568
	G	427
	J	Ø 400



Příloha G - Vysoce hlinité tvarovky na bázi andaluzitu

JAKOST		V-AN55	V-AN60
Žáruvzdornost [°C]		1780	1820
Chemické složení	Al ₂ O ₃ [min %]	55	60
	Fe ₂ O ₃ [max %]	1,8	1,8
Objemová hmotnost [g/cm³]		2,4	2,53
Zdánlivá pórovitost [max %]		17	15
Pevnost v tlaku za studena [min MPa]		50	70
Odolnost proti deformaci v žáru [min °C]	t _{0,6}	1520	1700
	t _{0,5}	-	1600
Odolnost proti náhlým změnám teploty [min cykl., cycl., cykl.]		30	35
Trvalé lineární změny [max % (°C/hod), % (°C/hrs), % (°C/Stunden)]		± 0,3 (1500/5)	± 0,3 (1500/5)
Tepelná vodivost [W/mK (°C)]		1,69 (900)	2,55 (1200)

Příloha H - Tepelně izolační tvarovky

JAKOST		IZOKER IZ05/2	IZOKER IZ15
Žáruvzdornost [°C]		1240	1730
Klasifikační teplota [°C]		1100	1400
Manipulační pevnost [min N]		-	-
Chemické složení	Al ₂ O ₃ [%]	16	45
	SiO ₂ [%]	58	-
	H ₂ O [max %]	-	-
Ztráty žháním [max %]		-	-
Objemová hmotnost [g/cm²]		0,5	1,6
Zdánlivá pórovitost		-	42
Pevnost v tlaku za studena [min Mpa]		1,8	20
Trvalé lineární změny [max % (°C/hod), % (°C/hrs), % (°C/Studen)]		-1,2 (1100/5)	-0,5 (1400/5)
Tepelná vodivost [W/mK (°C)]		0,19 (600)	0,74 (800)